

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra robotiky

**Laboratorní pracoviště s robotem ABB**

**IRB 1400**

**Laboratory Workplace with Robot ABB**

**IRB 1400**

Student:

Bc. Stanislav Herudek

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Zdeněk Konečný Ph.D.

Ostrava 2018



## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Stanislav Herudek**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2301T013 Robotika  
Téma: **Laboratorní pracoviště s robotem ABB IRB 1400**  
**Laboratory Workplace with Robot ABB IRB 1400**

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

- 1) Analyzujte reálné možnosti využití robotu ABB IRB 1400, instalovaného v centru robotiky, pro laboratorní cvičení.
- 2) Definujte harmonogram činností nutných pro realizaci laboratorního pracoviště s tímto robotem. Určete priority jednotlivých činností, včetně závazných termínů jejich plnění.
- 3) Vytvořte podmínky pro zprovoznění řídicího systému pro robot. Navrhněte alternativy způsobu řízení, vyberte nejvhodnější.
- 4) Navrhněte několik laboratorních úloh při respektování možností využití internetu věcí a aplikací rozšířené reality ve výuce.
- 5) Proveďte výběr nejvhodnější varianty a vypracujte podrobný návod vybrané úlohy pro posluchače.
- 6) Připravte podklady pro realizaci navržené úlohy v centru robotiky, (podle pokynů vedoucího práce).
- 7) V závěru diplomové práce zhodnoťte dosažené výsledky.

Práci též doložte v elektronické podobě, ve formátu editoru MSWORD a konstrukční řešení v CAD systému (podle pokynů vedoucího).

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] ČSN 01 6910 *Úprava písemností psaných strojem nebo zpracovaných textovými editory*. Praha: Český normalizační institut, srpen 1997. 36 s.
- [2] *Citace PRO plus* [online]. [cit. 2017-11-08]. Dostupné z: <<https://www.citacepro.com>>
- [3] KOLÍBAL, Z a kol. *Roboty a robotizované výrobní technologie*. I. vydání. Havlíčkův Brod: VUTUM, 2016, 786 s. ISBN 978-80-214-4828-5.
- [4] BURKOVIČ, Jan. *Navrhování RTP*. [online]. [cit. 2012-11-07] 1. vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava 2002. 112 s. ISBN 80-248-0217-1. Dostupné z [www:< http://robot.vsb.cz/file.php/navrhovani-rtp.pdf>](http://robot.vsb.cz/file.php/navrhovani-rtp.pdf)
- [5] *PTC Augmented Reality* [online]. [cit. 2017-11-08]. Dostupné z: <<https://www.ptc.com/en/products/augmented-reality>>
- [6] *Av Engineering ThingWorx* [online]. [cit. 2017-11-08]. Dostupné z: <<http://www.aveng.cz/software->



services/software/thingworx>

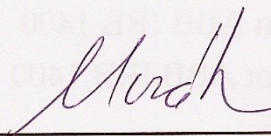
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Zdeněk Konečný, Ph.D.**

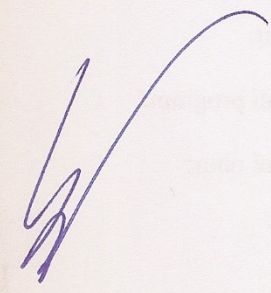
Konzultant diplomové práce: Pavel Šubrt

Datum zadání: 08.12.2017

Datum odevzdání: 21.05.2018

  
\_\_\_\_\_  
prof. Dr. Ing. Petr Novák  
vedoucí katedry

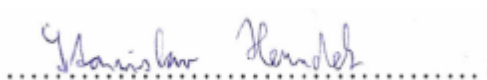


  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 21. května 2018



Stanislav Herudek

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- беру на ве́домі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou diplomovou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této diplomové práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- беру на ве́домі, že – podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů – že tato diplomová práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 21. května 2018



Stanislav Herudek

Střední 166, Dolní Benešov – Zábřeh, 747 22



## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

HERUDEK, S. *Laboratorní pracoviště s robotem ABB IRB 1400: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra robotiky, 2018, 86 s. Vedoucí práce: Konečný, Z.

Tato práce se zabývá návrhem laboratorního pracoviště s robotem ABB IRB 1400 v univerzitním centru robotiky, které má sloužit při výuce. Nejprve byla provedena analýza možností robotu pro využití v pracovišti s laboratorními úlohami. Dále byl stanoven harmonogram činností pro realizaci návrhu. Byly navrženy varianty pracoviště a vybrána vítězná verze. Dále bylo navrženo několik verzí laboratorních úloh. Při návrhu pracoviště a úloh bylo uvažováno použití rozšířené reality a internetu věcí. Nakonec byl vypracován návod pro laboratorní úlohy a byly zpracovány podklady pro realizaci pracoviště dle pokynů vedoucího.

## ANNOTATION OF MASTER THESIS

HERUDEK, S. *Laboratory Workplace with Robot ABB IRB 1400: Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Robotics, 2018, 86 p. Thesis head: Konečný, Z.

This thesis deals with a design of laboratory workplace with robot ABB IRB 1400 in the university robotics centre. Firstly, analysis of the robot capabilities was performed to determine its potential for utilization in laboratory workplace. Consequently, time schedule was elaborated for the workplace design realization. A number of laboratory workplaces versions were designed and the final version was selected. Furthermore, several laboratory exercises were designed. The workplace and laboratory exercises were designed to enable use of augmented reality and the internet of things. Instructions for a laboratory exercise and supporting documents for the workplace were elaborated according to instructions of the thesis head.

# Obsah

Seznam použitých značek a symbolů .....	10
1. Úvod .....	11
2. Analýza současného stavu .....	12
2.1 ABB IRB 1400 .....	12
2.2 Analýza pracoviště .....	15
2.3 Internet věcí a rozšířená realita .....	17
2.3.1 Internet věcí .....	17
2.3.2 Rozšířená realita .....	18
2.4 Technologická platforma pro IoT a AR .....	20
2.5 Digitální dvojče .....	21
3. Harmonogram činností .....	22
4. Řízení robotu .....	24
4.1 Rozbor programování robotů .....	24
4.1.1 Online programování .....	24
4.1.2 Offline programování .....	25
4.2 Řízení robotu ABB IRB 1400 .....	26
5. Návrh variant pracoviště .....	28
5.1 Varianta 1a .....	28
5.2 Varianta 1b .....	29
5.3 Varianta 2 .....	30
6. Výběr vhodné varianty pracoviště .....	32
6.1 Hodnoty kritérií .....	32
6.2 Volba kritérií .....	32
6.3 Hodnocení kritérií .....	32
6.4 Zhodnocení variant pracovišť .....	33
6.5 Určení významnosti kritérií .....	33
6.6 Celkový součet vážených indexů variant .....	34

6.7 Výsledek vícekritériální analýzy .....	35
7. Návrh otočného stolu .....	36
7.1 Požadavky na otočný stůl .....	36
7.2 Otočná část stolu .....	36
7.2.1 Varianta 1 otočné části .....	36
7.2.2 Varianta 2 otočné části stolu .....	38
7.2.3 Varianta 3 otočné části stolu .....	39
7.3 Finální model otočného stolu .....	40
7.3.1 Parametry otočného stolu .....	40
7.4 Pohonná jednotka otočného stolu .....	41
7.4.1 Krokový motor .....	41
7.4.2 Planetová převodovka .....	42
7.4.3 Výpočet pohonné jednotky otočného stolu .....	43
7.5 Uložení vertikální osy stolu .....	46
7.5.1 Kontrola hřídelových per .....	48
7.5.2 Kontrola hřídelového pera převodovky .....	50
7.6 Rám otočného stolu .....	52
8. Finální verze pracoviště .....	54
8.1 Použité komponenty .....	55
8.1.1 Schunk PGN-plus 80-1 .....	55
8.1.2 Schunk GWB-64 .....	55
8.1.3 Schunk PZN-plus 64-1 .....	56
8.1.4 Schunk PGF 80 AS .....	57
8.1.5 Systém rychlé výměny Schunk SHK-040-000-000 .....	58
8.2 Dispoziční řešení pracoviště .....	58
8.3 Zabezpečení pracoviště .....	59
8.4 Logika pracoviště .....	61
8.4.1 Posloupnost činností .....	61



8.4.2 Logika pracoviště .....	62
9. Návrh laboratorních úloh .....	64
9.1 Hanojské věže .....	64
9.2 Jenga.....	64
9.3 Úloha s fixy .....	65
10. Implementace internetu věcí a rozšířené reality .....	66
10.1 ThingWorx Foundation .....	66
10.2 ThingWorx Studio.....	67
10.3 Hanojské věže .....	68
10.4 Jenga.....	68
10.5 Montáž pohonu otočného stolu .....	69
10.5.1 Tvorba Model Tagu.....	69
10.5.2 Tvorba Thing Shapes .....	70
10.5.3 Tvorba Thing Template.....	72
10.5.4 Tvorba Thing.....	72
10.5.6 ThingWorx Studio.....	73
11. Návod k laboratorní úloze .....	74
12. Závěr.....	77
Seznam obrázků .....	80
Seznam tabulek .....	82
Seznam použité literatury.....	83
Seznam příloh.....	86

## Seznam použitých značek a symbolů

Značka	Jednotka	Význam
$i$	$[-]$	Převodový poměr převodovky
$J_C$	$\text{kg.m}^{-2}$	Celkový moment setrvačnosti
$J_h$	$\text{kg.m}^{-2}$	Moment setrvačnosti hřídele
$J_m$	$\text{kg.m}^{-2}$	Moment setrvačnosti rotoru motoru
$J_p$	$\text{kg.m}^{-2}$	Moment setrvačnosti převodovky
$J_{\text{red}}$	$\text{kg.m}^{-2}$	Redukovaný moment setrvačnosti
$l$	$\text{mm}$	Délka hřídelového pera
$l_{\text{min}}$	$\text{mm}$	Minimální délka hřídelového pera
$M$	$\text{N.m}$	Požadovaný krouticí moment pohonné jednotky
$M_c$	$\text{N.m}$	Celkový krouticí moment pohonné jednotky
$M_m$	$\text{N.m}$	Krouticí moment motoru
$M_{\text{roz}}$	$\text{N.m}$	Rozběhový moment motoru
$p_D$	$\text{MPa}$	Dovolené napětí
$t$	$\text{s}$	Celková doba pootočení stolu
$t_l$	$\text{mm}$	Hloubka drážky v náboji
$t_b$	$\text{s}$	Doba brzdění pohonné jednotky
$t_z$	$\text{s}$	Doba zrychlení pohonné jednotky
$\varepsilon_z$	$\text{rad.s}^{-2}$	Úhlové zrychlení pohonné jednotky
$\varphi$	$\text{rad}$	Úhel pootočení otočného stolu
$\tau_S$	$\text{MPa}$	Namáhání na střih
$\tau_{DS}$	$\text{MPa}$	Dovolené namáhání na střih
$\omega$	$\text{rad.s}^{-1}$	Úhlová rychlost pohonné jednotky
$\omega_m$	$\text{rad.s}^{-1}$	Úhlová rychlost motoru

## 1. Úvod

Účelem této práce je návrh robotizovaného pracoviště s robotem ABB IRB 1400 v univerzitním centru robotiky. Navržené pracoviště musí umožnit studentům Katedry robotiky práci s robotem ABB IRB 1400 v rámci výuky prostřednictvím laboratorních úloh.

Vzhledem k současným trendům rozvoje digitalizace strojírenství a koncepce průmyslové výroby s názvem Průmysl 4.0 bylo rozhodnuto o zahrnutí internetu věcí a rozšířené reality do navrženého laboratorního pracoviště.

Prvním krokem této práce je analýza reálného využití robotu pro laboratorní cvičení, což zahrnuje analýzu parametrů robotu a analýzu aplikací, při kterých je tento typ robotu obvykle používán, podle čehož budou navrženy vhodné pracoviště a typy laboratorních úloh. Následujícím krokem je zprovozněním řídicího systému, analýza možných způsobů řízení a výběr nejvhodnějšího.

Dále byt vytvořen harmonogram činností pro realizaci návrhu pracoviště, který obsahuje termíny plnění a priority jednotlivých činností.

Varianty pracovišť a jednotlivých úloh byly vytvořeny na základě předchozích bodů. Při návrhu pracovišť a laboratorních úloh je respektováno využití internetu věcí a rozšířené reality ve výuce. Následuje výběr vhodné varianty, aplikování internetu věcí a rozšířené reality na konkrétním pracovišti. Jedna laboratorní úloha je doplněna o návod pro posluchače.

Podklady pro realizaci navrženého pracoviště byly zpracovány formou výkresové dokumentace.

Nakonec jsou dosažené výsledky diplomové práce zhodnoceny v závěru.



## 2. Analýza současného stavu

Tato kapitola diplomové práce se věnuje analýze reálných možností využití robotu ABB IRB 1400, který se nachází v univerzitním centru robotiky a také samotnému pracovišti.

### 2.1 ABB IRB 1400

Jedná se o šestiosý robot robotu od společnosti ABB typ IRB1400 M2000, který byl navržen pro průmyslovou výrobu a umožňuje rozšířené možnosti v oblasti automatizace. Řídicí jednotka robotu umožňuje komunikaci s ostatními externími systémy. Tento konkrétní robot je vybaven operačním systémem BaseWare OS, který ovládá všechny aspekty robotu, jako pohyb, tvorbu programů, komunikaci atd.



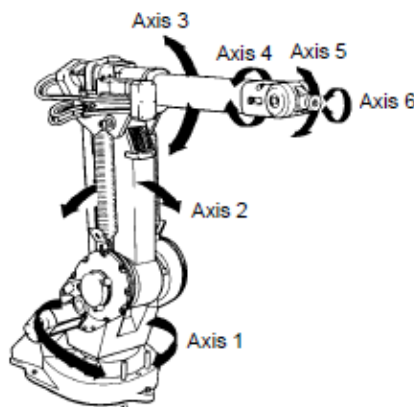
Obr. 1 Robot ABB IRB 1400

#### Základní parametry:

Parametr	Hodnota
Nosnost robotu	5 kg
Počet stupňů volnosti	6
Maximální dosah	1440 mm
Opakovatelnost	0,05 mm
Řídicí jednotka	S4C+
Hmotnost robotu	225 kg
Aplikace	Svařování obloukem, manipulace a procesní aplikace

Tab. 1 Parametry robotu ABB IRB 1400 [1]

Robot se skládá ze dvou částí, konkrétně z aktivního členu – manipulátoru a řídicího systému. V tomto případě se jedná o verzi pro připevnění k podlaze.



Obr. 2 Popis jednotlivých os robotu [1]

Osa robotu	Rozsah pohybu
Osa 1	+170° až -170°C
Osa 2	+70° až -70°C
Osa 3	+70° až -65°C
Osa 4	+150° až -150°C
Osa 5	+115° až -115°C
Osa 6	+300° až -300°C

Tab. 2 Rozsah jednotlivých os robotu [1]

Řídicí jednotka S4C+ obsahuje elektroniku pro řízení manipulátoru, externí osy a periferní zařízení. Operace a programování může být realizováno pomocí teach pendantu, který je součástí řídicí jednotky robotu.

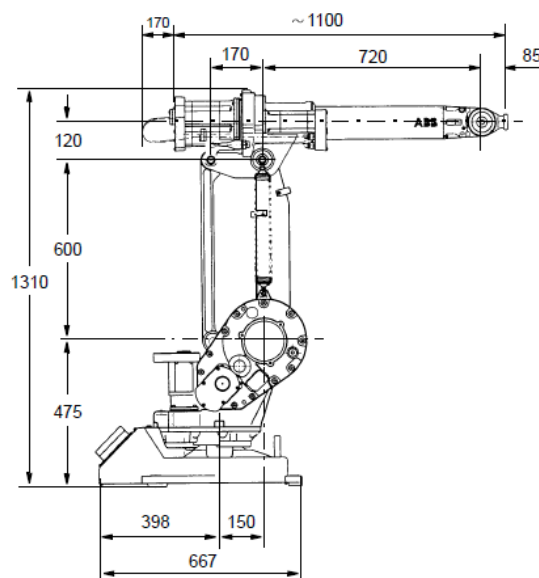


Obr. 3 Řídicí jednotka robotu [2]

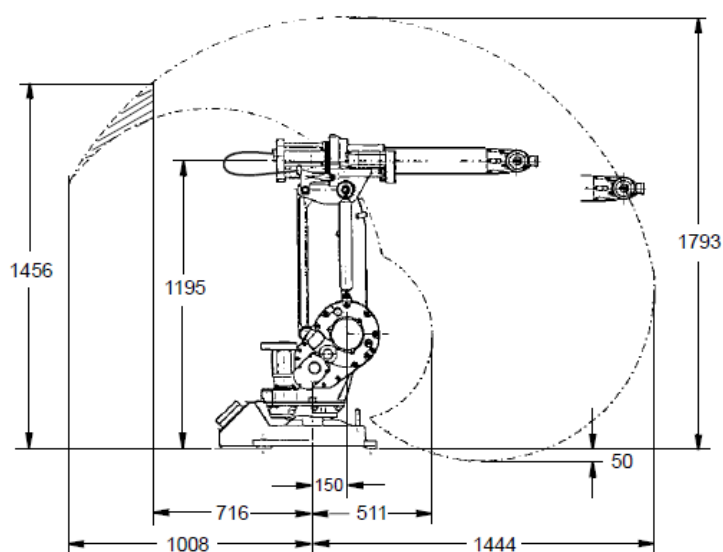
Parametr	Hodnota
Hmotnost	240 kg
Rozměry	950 x 800 x 540 mm
Paměť	2,5 MB
Ovládání	Teach-pendant

**Tab. 3 Parametry řídicí jednotky S4C+ [1]**

Mezi další důležité parametry patří rozměry robotu a jeho pracovní prostor, který je definován rozsahem pohybu robotu viz Obr. 4 a Obr. 5.



**Obr. 4 Rozměry robotu [1]**



**Obr. 5 Rozsah pohybu robotu [1]**



Robot ABB IBR 1400 s řídicí jednotkou S4C+ bývá nejčastěji používán pro aplikace svařováním obloukem, manipulaci s lehčími objekty a procesní aplikace.

Vzhledem k nasazení v univerzitním centru robotiky není možné aplikovat robot ke svařování obloukem a dalším technologicky náročným aplikacím, neboť by bylo zapotřebí vybavit pracoviště nákladnými a složitými systémy ventilace, periferním zařízením a zabezpečením celého pracoviště pro výuku.

## 2.2 Analýza pracoviště

Laboratorní pracoviště se nachází v univerzitním centru robotiky a je vybaveno jedním šestiosým průmyslovým robotem ABB IRB 1400, který je umístěn na podlaze.



**Obr. 6 Aktuální stav pracoviště**

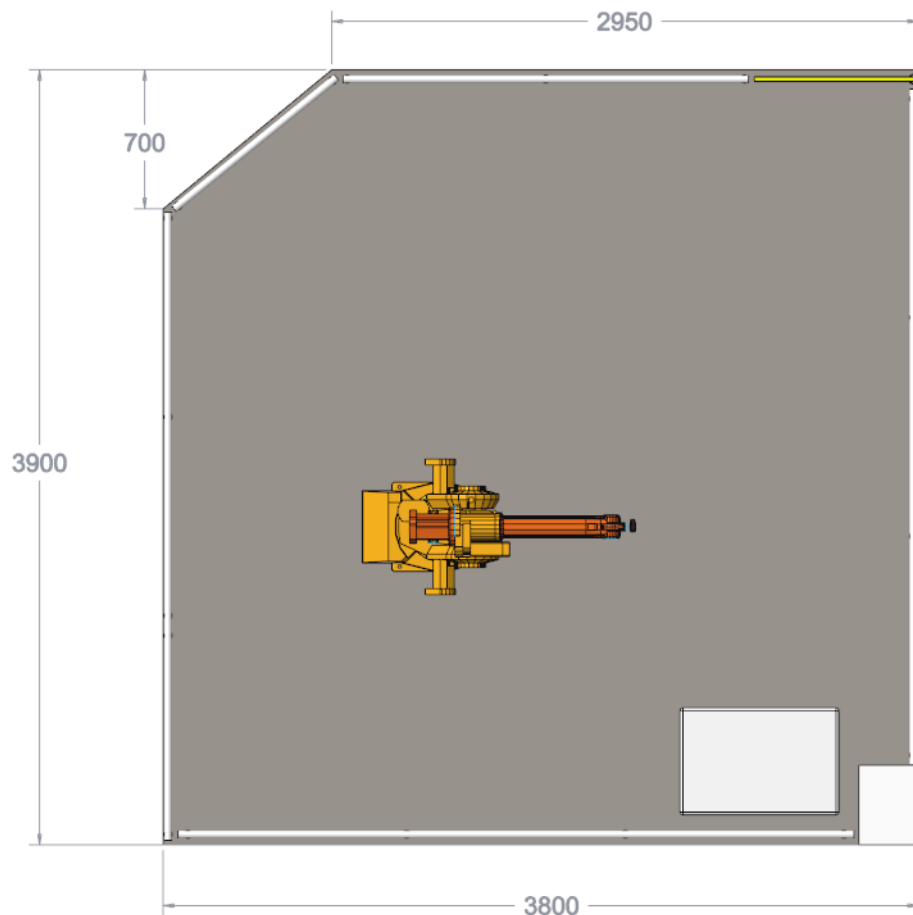
Robot je řízen pomocí řídicího systému ABB S4C+, který je vybaven Teach Pendantem pro programování robotu. Řídicí systém je možné propojit s různými analogovými a digitálními vstupy a výstupy.



**Obr. 7 Řídicí jednotka S4C+**

Na robotizovaném pracovišti se nenachází žádné periferní zařízení, které by mohlo být použito při návrhu nového pracoviště. Pracoviště je vybaveno nástěnnými zásuvkami s napětím 400V a 230V. Dále je možné se připojit na přívod stlačeného vzduchu, což umožňuje i použití pneumatických prvků na pracovišti.

Rozměry pracoviště v univerzitním centru robotiky jsou přibližně 3,9 m x 3,8 m. Pro lepší názornost velikosti pracoviště bylo vypracováno zjednodušené schéma půdorysu pracoviště.



Obr. 8 Půdorys pracoviště

## 2.3 Internet věcí a rozšířená realita

V této podkapitole bude rozebrán Internet věcí, rozšířená realita a možnost jejich nasazení v rámci robotizovaného technologického pracoviště.

### 2.3.1 Internet věcí

Internet věcí, neboli Internet of Things (IoT), lze chápat, jako libovolná zařízení či software připojená na internet nebo počítačové sítě, jež mohou fungovat jako snímače a které lze ovládat a používat pro výměnu dat.

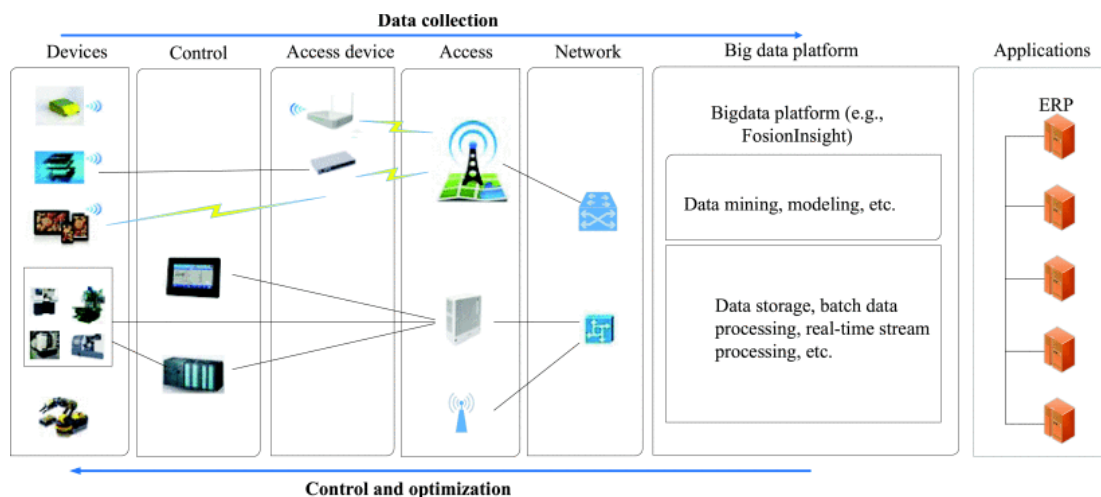
Věcí, v rámci Internetu věcí, může být člověk, zvíře či jakýkoli přírodní nebo člověkem vytvořený objekt, kterému je možno přidělit IP adresu se schopností přenosu dat po síti. [3]

Cílem IoT je propojení zařízení, systémů a služeb za účelem poskytnutí více dat, která mohou být převedena na informace a informace na znalosti, které lze následně aplikovat. IoT systémy tak mohou na základě získaných znalostí vytvářet rozhodnutí a autonomně provádět činnosti. [4]



Hlavní požadavky na IoT vycházejí z výše uvedených cílů. Architektura tvořící IoT musí umožnit:

- sběr dat/informací/znalostí
- uložení dat/informací/znalostí
- analýzu dat/informací/znalostí
- sdílení výsledků
- bezpečnost



**Obr. 9 IoT architektura [5]**

V rámci IoT existují dva hlavní směry, na něž je možné IoT dělit. Konkrétně jde o průmyslový internet věcí, Industrial Internet of Things (IIoT), a spotřebitelský internet věcí, Consumer Internet of Things (CIoT).

Průmyslový internet se zaměřuje na úlohy v průmyslových odvětvích, mezi které se řadí průmyslová automatizace, energetický průmysl, dopravní průmysl a zdravotnictví. Z toho vyplývá, že jsou pro průmyslový internet věcí charakteristické velké datové toky z průmyslových systémů strojů nebo provozů. [4]

Spotřebitelský internet věcí naproti tomu zaměřen na spotřebitele a jeho spotřebitelská zařízení a spotřebiče (tzv. chytrá zařízení), jsou pro něj charakteristické nižší datové toky. Dalším rozdílem je, že u spotřebitelského IoT se nejedná o životně důležité systémy, které přenášejí důležitá data, nýbrž slouží ke zvýšení spotřebitelského užitku. [4]

### 2.3.2 Rozšířená realita

Zjednodušená definice rozšířené reality, Augmented Reality (AR), pro lepší pochopení tohoto pojmu byla volně přeložena z definice Borivoje Furhta, kterou uvádí ve své knize

Handbook of Augmented Reality [7]: AR používá skutečnou realitu fyzického světa, do níž jsou vnořeny počítačově vytvořené objekty, což ve výsledku vytváří mix skutečné reality s virtuální realitou. Tohle rozšíření reality probíhá obvykle v reálném čase na pozadí skutečného okolí. Pomocí použití AR a nejnovějších technologií se stávají informace okolním reálným světem interaktivní a digitálně využitelné.

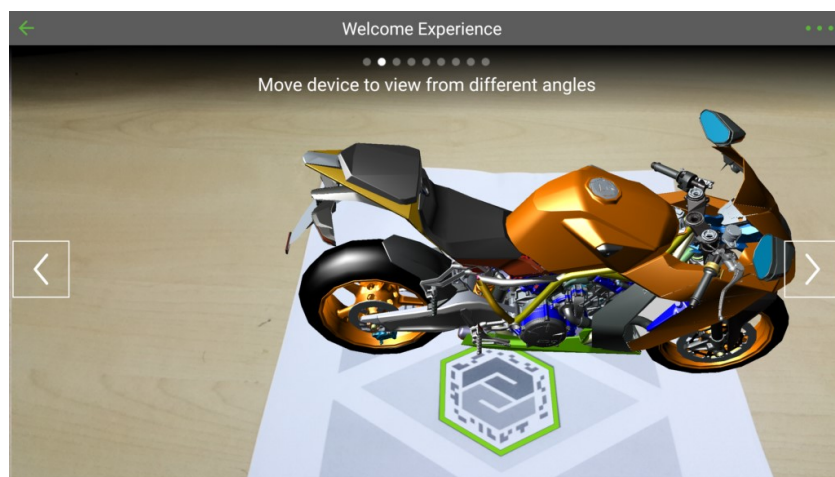
AR kombinuje několik různých technologií tvořících celek, který je potřebný ke správnému fungování a zobrazení. Pro správné fungování a zobrazení AR jsou potřeba tyto systémy:

- 1) Snímací zařízení: kamera nebo fotoaparát. Snímá reálné prostředí, které se v reálném čase posílá do výpočetního zařízení.
- 2) Výpočetní zařízení: počítač, smartphone a podobně. Provádí veškeré softwarové operace potřebné k AR.
- 3) Zobrazovací zařízení: monitor, smartphone, dataprojektor a head-mounted display brýle (HDM brýle). Zobrazuje výsledný obraz. [8]

V současné době se převážně používá v praxi AR, která působí na vizuální smysly a v omezenější míře je aplikovatelná i AR, která působí na sluchové smysly.

Dalším důležitým aspektem rozšířené reality je trackování (sledování cíle). Existuje několik způsobů trackování.

Prvním způsobem je použití markerů, který využívá předem vyznačené body pro orientaci v prostoru. Těmito markery mohou být QR kódy, čárové kódy nebo jiné tištěné černobílé nebo i barevné značky, které snímací zařízení dokáže snadno rozpoznat a v reálném čase na jeho místo vloží předem definovaný prvek (např. animace, 3D model).



Obr. 10 Příklad použití markerů [9]



Obr. 11 Čárový kód a QR kód [8]

Mezi další metody trackování patří geo-lokační metoda AR, která na rozdíl od předchozí metody nepotřebuje markery. Pro určení orientace v prostoru je potřeba vyhodnocení souřadnic GPS, gyroskopu a také kompasu. Díky těmto prvkům zařízení dokáže určit svou polohu a natočení objektivu snímacího zařízení.

Dále existují speciální metody trackování, které jsou integrovány do komplexního systému, navrženému pro speciální účel. Může to být například systém kombinující markery s dalšími metodami trackování.

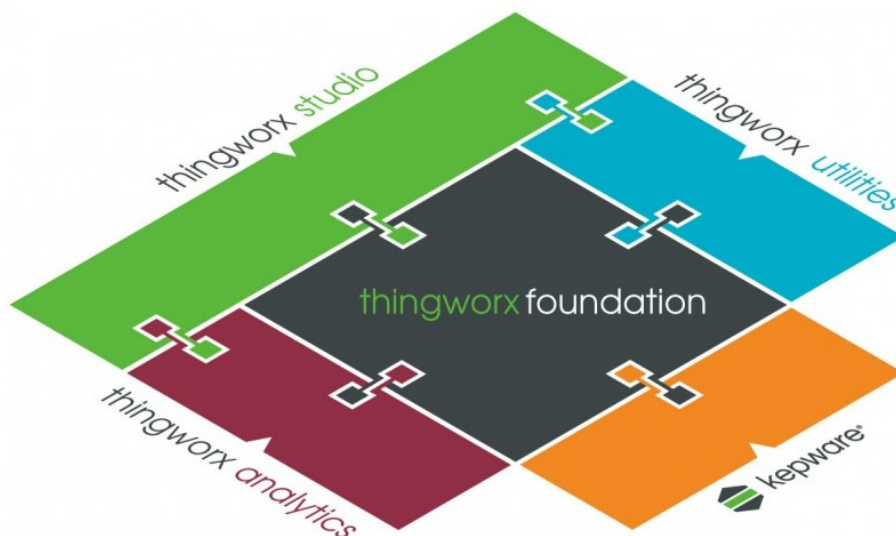
## 2.4 Technologická platforma pro IoT a AR

Kombinací IoT a AR lze získat přenášená data ve skutečném čase o modelu přímo v kontaktu s vizualizací modelu pomocí digitálního dvojčete daného modelu. Rozebrání významu pojmu digitální dvojče je uvedeno níže v práci.

Navzdory několika existujícím platformám pro implementaci IoT a AR do navrhovaného pracoviště byla třeba zohlednit dostupnost na VŠB-TUO. Vzhledem k dostupnosti produktů společnosti PTC na Fakultě strojní a zvláště pak na Katedře robotiky byla zvolena platforma Thingworx. Tato platforma umožňuje výhodnější implementaci dat ze softwarové řady PTC CREO a Illustrate společnosti PTC.

ThingWorx je technologická platforma, která byla od počátku vyvíjena pro internet věcí. Obsahuje sadu specifických IoT nástrojů, které jsou otevřené pro budoucí rozvoj. Platforma ThingWorx slouží k rozvoji aplikací a služeb, které spojují fyzický svět s digitálním. Přináší užitek nejen koncovému uživateli výrobku, který využívá výhod připojeného výrobku, umožňuje rovněž vytvořit digitální dvojče (Digital Twin) a výrobek inovovat, zdokonalovat, či vydat se cestou Industrie 4.0 (EU), Smart Manufacturing (USA) a Made In China 2025 (MiC2025, Čína). [10]

Největší hodnota internetu věcí spočívá v datech. Každé připojené zařízení může každý den generovat potenciálně milióny dat, ale mnohé z těchto dat zůstávají zcela nevyužity. Shromažďování, analýza a zpětné využití těchto dat je úkol pro ThingWorx. [10]



Obr. 12 Komponenty platformy Thingworx [9]

## 2.5 Digitální dvojče

Digitální dvojče zahrnuje vizuální digitální kopii daného zařízení pomocí 3D modelu a dále spojení s daty, která jsou přenášena ze skutečného zařízení.

Tento koncept umožňuje rychlejší validaci návrhu a konfiguraci daného zařízení v přípravném stádiu návrhu, čímž se snižuje riziko chyb či případných poruch v pozdějších fázích vývoje produktu. Je také možné snadněji simulovat a monitorovat provoz zařízení a tok výroby pomocí implementace a vyhodnocení různých ukazatelů.

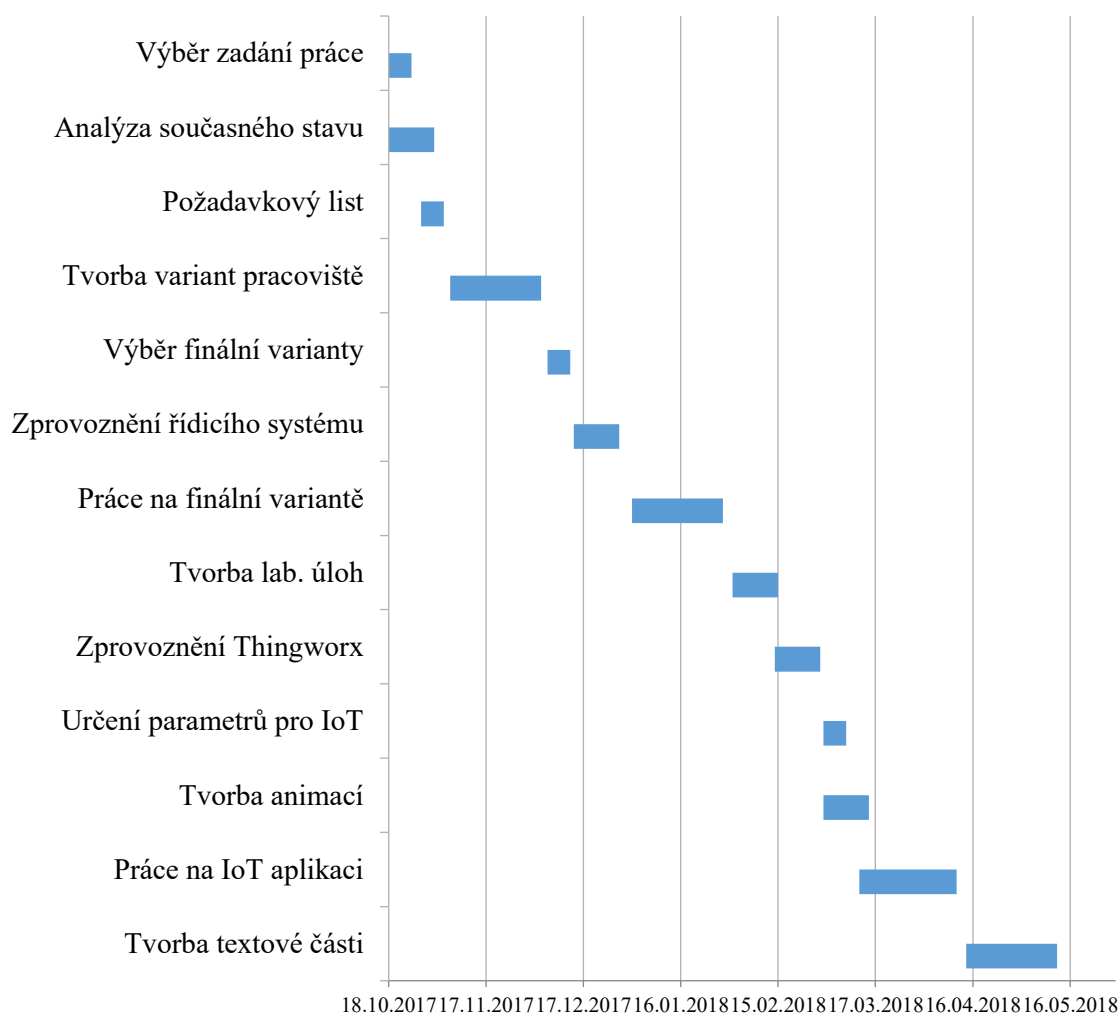
### 3. Harmonogram činností

Pro lepší přehlednost a grafické vyjádření posloupnosti činností v čase byl zvolen Ganttův diagram. Nejvyšší prioritu při realizaci pracoviště má tvorba 3D modelu pracoviště a laboratorních úloh, následně implementace rozšířené reality a internetu věcí. Nižší prioritu mají body práce týkající se zprovoznění řídicího systému robotu, neboť práce bude realizována formou 3D modelu a tudíž je celkový přínos tohoto bodu nižší, než ostatních bodů zadání této práce.

Činnost	Počátek	Ukončení	Počet dní
Výběr zadání bakalářské práce	18.10.2017	25.10.2017	7
Analýza současného stavu	18.10.2017	1.11.2017	14
Požadavkový list	28.10.2017	1.11.2017	7
Tvorba variant pracoviště	6.11.2017	4.12.2017	28
Výběr finální varianty pracoviště	6.12.2017	13.12.2017	7
Zprovoznění řídicího systému	14.12.2017	28.12.2017	14
Práce na finální variantě	1.1.2018	29.1.2018	28
Tvorba lab. úloh	1.2.2018	15.2.2018	14
Zprovoznění Thingworx	14.2.2018	28.2.2018	14
Určení parametrů pro IoT	1.3.2018	8.3.2018	7
Tvorba animací	1.3.2018	15.3.2018	14
Práce na IoT aplikaci	12.3.2018	17.4.2018	30
Tvorba textové části	14.4.2018	12.5.2018	28

**Tab. 4** Soupis činností



**Obr. 13 Ganttův diagram činností**

## 4. Řízení robotu

Průmyslové roboty jsou řízeny na základě předem připravených programů. Program se skládá z příkazů jdoucích v určité posloupnosti pro vykonání úlohy. Existuje několik způsobů pro řízení robotu. V této kapitole budou stručně popsány způsoby řízení průmyslových robotů a poté možnost jejich využití v navrhovaném pracovišti.

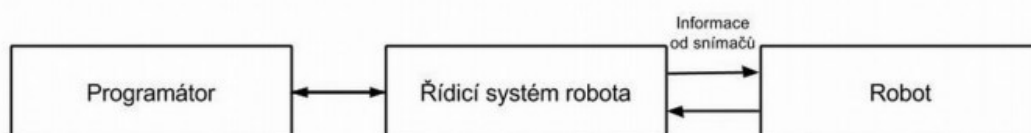
### 4.1 Rozbor programování robotů

Programování průmyslových robotů lze rozdělit na do dvou základních skupin, tedy:

- Online programování
- Offline programování

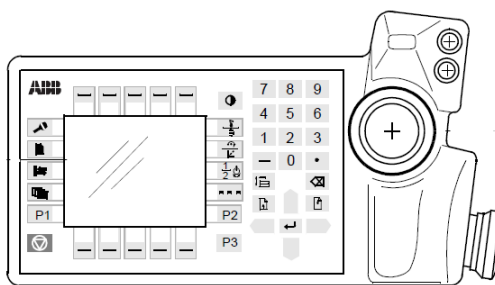
#### 4.1.1 Online programování

On-line programování umožňuje přímou interakci člověka s robotem. Programování je vykonáváno naváděním robota přes požadované manipulační body, které jsou zapisovány do řídicího systému robotu. Po navádění do jednotlivých pozic pak následuje logické řízení koncového efektoru, nástroje nebo případných periferních zařízení. Programování provádí uživatel přímo na pracovišti pomocí uživatelského rozhraní tzv. teach-pendantu, který plní funkci ovládacího panelu. [11]



Obr. 14 Online programování [11]

Výhodou této metody programování je znalost trajektorie robota a práce v reálném prostředí s možností současné kontroly funkčnosti programu. Mezi nevýhody pak lze zařadit poměrně dlouhou dobu programování při složitějších manipulačních pohybech nebo cyklech. Hlavní nevýhodou však představuje odstávka pracoviště, která způsobuje ztrátu na výrobě. Pouze ojedinělé případy pak dovolují některým zařízením omezeně pracovat během programování. [11]

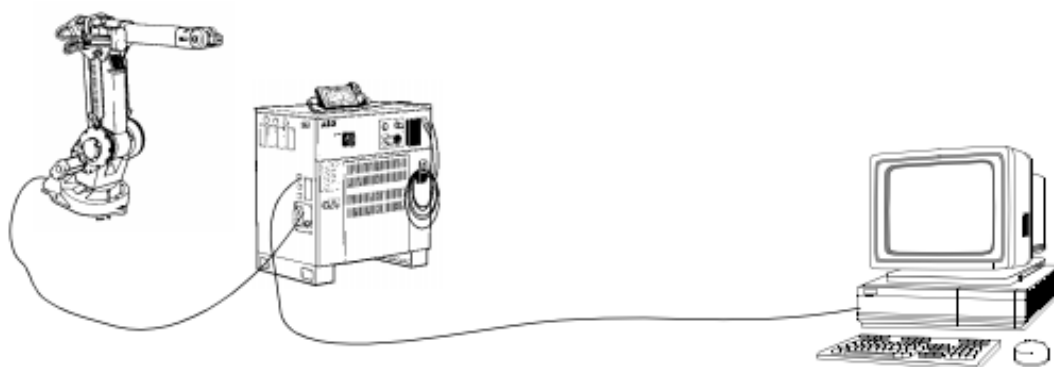


Obr. 15 Teach-pendamt robotu ABB IRB 1400 [1]

#### 4.1.2 Offline programování

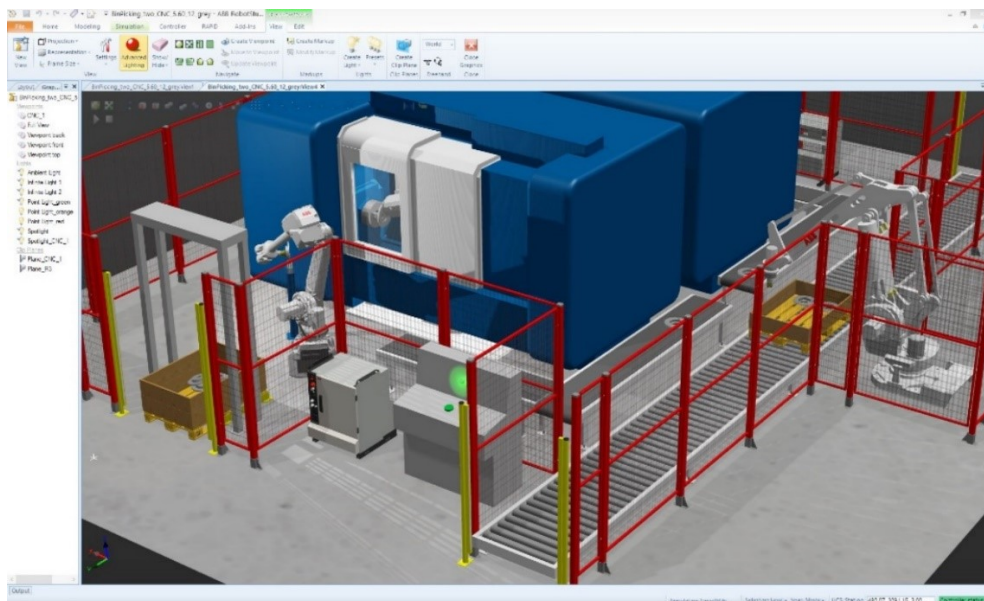
Offline programování je založeno na softwaru umožňujícím 3D virtuální simulaci robotizovaného pracoviště včetně jejího okolí. Programování se provádí v předstihu a softwary umožňují definici drah, pohybů a jiných činností robotu s ohledem na příslušné aplikace, které se pak exportují v příslušných formátech programovacích jazyků (KRL, RAPID atd.). Takto vygenerovaný program je pak dále možné nahrát do řídicího systému robotu. [11]

Na základě simulace činností je dále možno optimalizovat a upravovat chod robotu, sledovat celkový reálný pracovní čas, testovat dosažitelnosti bodů, dráhy, pracovní prostory, případně využívat různé doplňky a komponenty. Systémy také často podporují import součástí z různých CAD systémů a umožňují automatické generování dráhy s extrémně přesnými výpočty časů a pohybů vzhledem k vymodelovaným součástem. [11]



Obr. 16 Komunikace s robotem [1]

Nevýhodu pak představují další investice mimo robota, které tento programovací přístup vyžaduje. Na druhou stranu je však třeba poznamenat, že programovací software obsáhne všechny případné roboty i zařízení. [11]



Obr. 17 Offline programování v Robot Studiu [12]

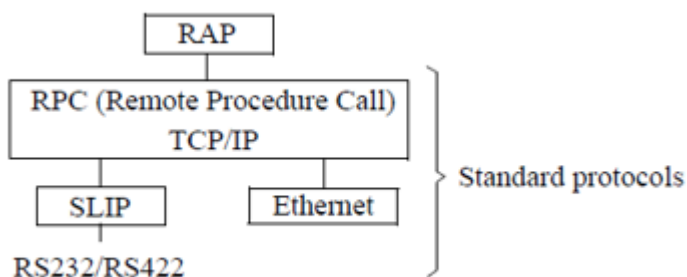
## 4.2 Řízení robotu ABB IRB 1400

Robot ABB IRB 1400 umožňuje jak online programování, tak i offline programování.

Offline programování robotu je možné pomocí teach-pendantu (Obr. 15), do kterého jsou zadávány instrukce a funkce v programovacím jazyce RAPID.

U online programování tohoto konkrétního robotu však existují určitá omezení, která limitují použití aplikování IoT do pracoviště. Tato omezení jsou podrobněji rozebrány níže.

Prvním omezením je stáří operačního systému Robot Ware OS, které nepodporuje novější verze softwaru Robot Studio, které jsou používány na Katedře robotiky (verze 5.15 a 6). Dále tento systém nezahrnuje rozšíření FactoryWare, která umožňuje propojení robotu s počítačem pomocí sériové linky (RS232/RS422, Ethernet). Toto omezení značně omezuje získávání dat ve skutečném čase z robotu a tím i aplikaci IoT a AR pracoviště.



Obr. 18 Komunikace s počítačem [1]

Dalším způsobem offline programování je použití nových verzí Robot Studia, provést simulaci a vygenerovaný kód RAPID uložit do souboru s koncovkou \*.prg. Tento soubor je možné nahrát do jednotky S4C+ pomocí diskety 3,5" 1,44 MB MS DOS format. Při tvorbě programu je také třeba zohlednit maximální délku názvů (targety, procedury, atd.), která nesmí překročit 8 znaků.



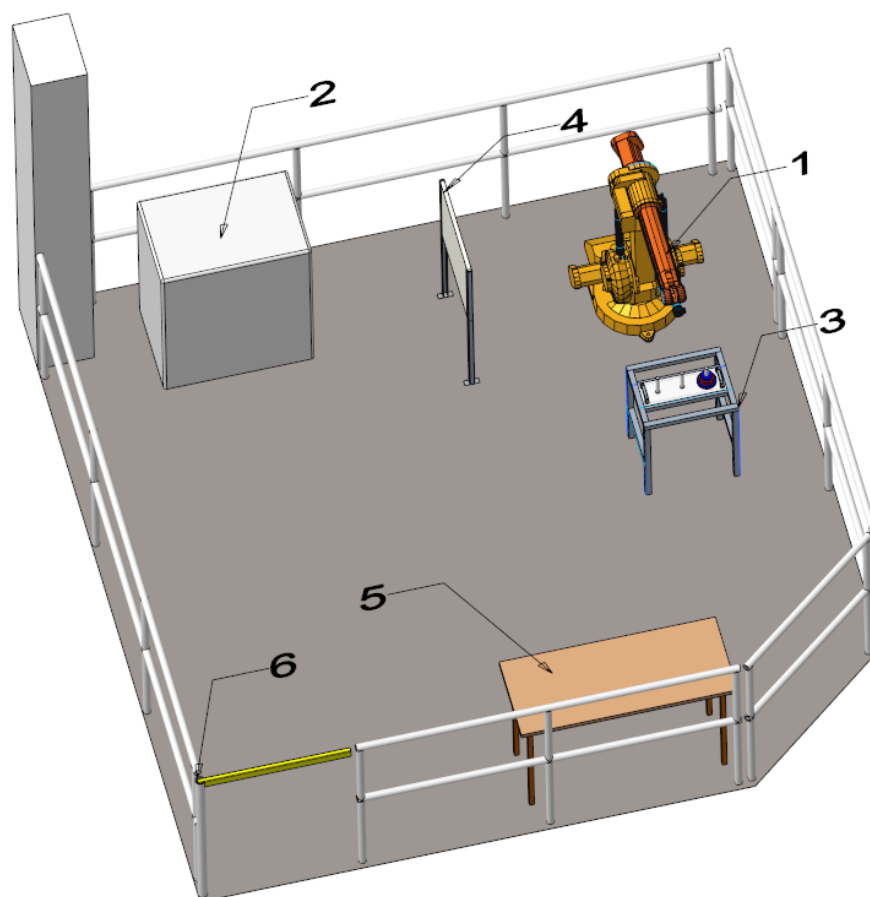
## 5. Návrh variant pracoviště

Po analýze současného stavu pracoviště v univerzitním centru robotiky je třeba přistoupit k návrhu variant pracoviště. Při návrhu pracoviště je třeba respektovat zadání práce a navrhnout pracoviště pro několik rozdílných laboratorních úloh.

Dále je třeba respektovat možnost využití pracoviště posluchači pro výuku řízení a programování průmyslových robotů, což v důsledku znamená pohyb studentů na pracovišti při ovládání robotu v manuálním režimu a tvorbě jejich vlastního programu pro konkrétní laboratorní úlohu.

## 5.1 Varianta 1a

Tato varianta počítá se stolem umístěným v pracovním prostoru robotu. Laboratorní úlohy jsou před zahájením programování manuálně umístěny nebo vyměněny za úlohu jiného typu. Na pracovišti je dále umístěn stojan s tabulí na stíratelné fixy. Pro uložení ostatních laboratorních úloh na pracovišti a odložení pomůcek studentů je určen stůl mimo pracovní dosah robotu.



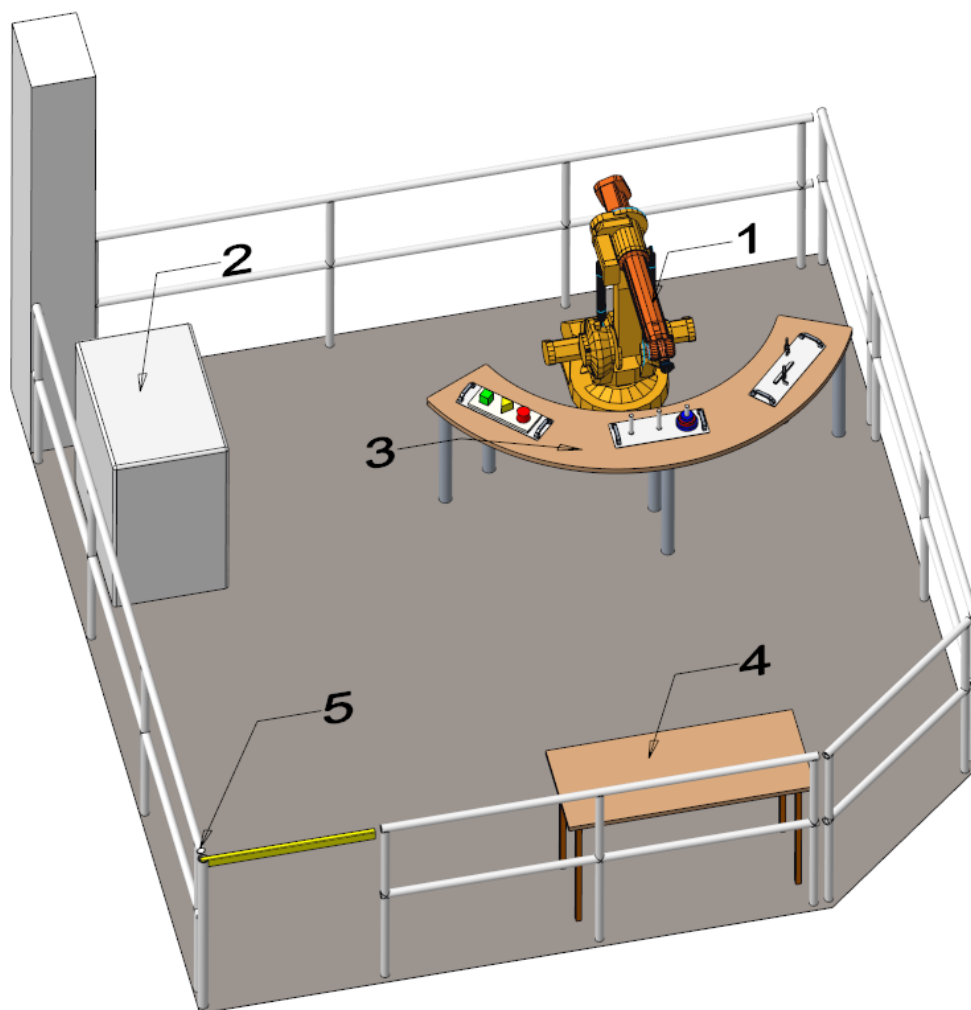
**Obr. 19 Varianta pracoviště 1a**

Název	Pozice
ABB IRB 1400	1
Řídicí systém S4C+	2
Stůl pro lab. úlohy	3
Tabule	4
Pomocný stůl	5
Zábradlí	6

Tab. 5 Popis varianty pracoviště 1a

## 5.2 Varianta 1b

Variant 1b je variací předchozí Varianty 1a. Na rozdíl od předchozí varianty se počítá s návrhem stolu, na který by bylo možno umístit více laboratorních úloh (alespoň 3). Tento stůl se musí nacházet v pracovním prostoru robotu. Pro uložení ostatních laboratorních úloh na pracovišti a odložení pomůcek studentů je určen stůl mimo pracovní dosah robotu.



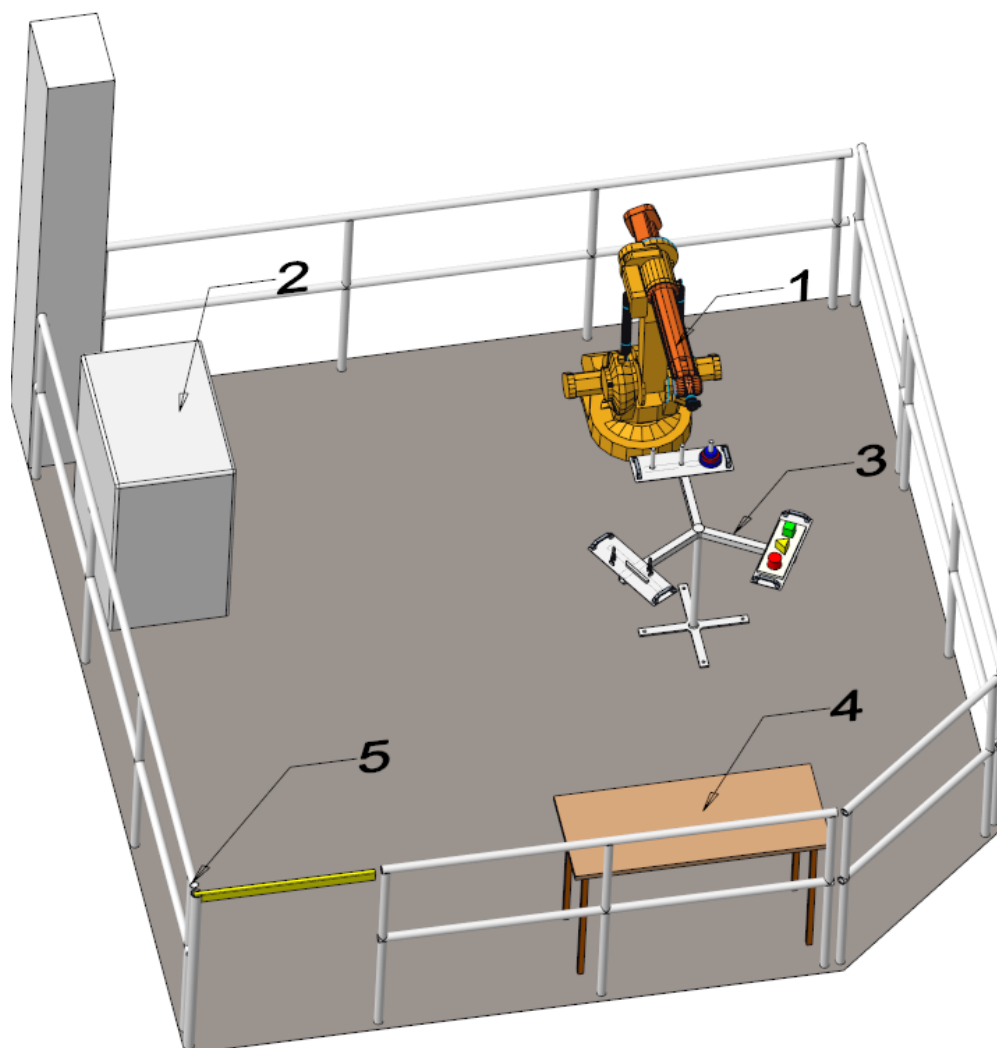
Obr. 20 Varianta pracoviště 1b

Název	Pozice
ABB IRB 1400	1
Řídicí systém S4C+	2
Stůl pro lab. úlohy	3
Pomocný stůl	4
Zábradlí	5

Tab. 6 Popis varianty pracoviště 1b

### 5.3 Varianta 2

Ve variantě pracoviště 2 byl navržen otočný stůl pro změnu jednotlivých laboratorních úloh. Otočný stůl na pracovišti musí umožnit uložení minimálně tří laboratorních úloh. Pro uložení ostatních laboratorních úloh na pracovišti a odložení pomůcek studentů je určen stůl mimo pracovní dosah robotu.



Obr. 21 Varianta pracoviště 2

<b>Název</b>	<b>Pozice</b>
ABB IRB 1400	1
Řídicí systém S4C+	2
Stůl pro lab. úlohy	3
Pomocný stůl	4
Zábradlí	5

**Tab. 7 Popis varianty pracoviště 2**

## 6. Výběr vhodné varianty pracoviště

Pro volbu nejvhodnější varianty byla použita vícekriteriální analýza. Varianty byly hodnoceny na základě níže uvedených kritérií. Hodnotící kritéria byla porovnána metodou trojúhelníku párů, čímž byla určena příslušná významnost každého kritéria. Po celkovém součtu vážených indexů jednotlivých variant byla varianta s nejvyšším počtem bodů vybrána jako nejvhodnější.

### 6.1 Hodnoty kritérií

Vysoká úroveň	3
Průměrná úroveň	2
Nízká úroveň	1
Nevyhovující úroveň	0

### 6.2 Volba kritérií

Označení kritéria	Kritérium	Charakteristika kritéria
K1	Počet stanovišť	Počet lab. úloh na pracovišti
K2	IoT a AR	Aplikovatelnost IoT a AR
K3	Zabraná plocha	Půdorys pracoviště
K4	Cena	Odhadovaná cena pracoviště

Tab. 8 Volba kritérií

### 6.3 Hodnocení kritérií

Kritérium	Varianta 1a	Varianta 1b	Varianta 2
K1 – Počet stanovišť	1	3 a více	3 a více
K2 – IoT a AR	Nevhodná	Přijatelná	Výhodná
K3 – Zabraná plocha	Nejmenší půdorys	Přijatelná	Přijatelná
K4 – Cena	Nízká	Nejnižší	Nejvyšší

Tab. 9 Hodnocení kritérií

Varianta 1a umožňuje použití pouze jedné lab. úlohy, čímž i snižuje možnost aplikace IoT a AR. Její silnou stránkou je zabraná plocha pracoviště a nízká pořizovací cena oproti Variantě 2.



Varianta 1b, která je obdobou Varianty 1a umožňuje využití většího množství lab. úloh a tím i využití IoT a AR při výuce. Výhodou této varianty je a nízká pořizovací cena oproti Variantě 2.

Varianta 2 umožňuje využití velkého počtu lab. úloh a aplikovatelnost IoT a AR i na otočný stůl. Nevýhodou je vyšší pořizovací cena v porovnání s předchozími variantami.

## 6.4 Zhodnocení variant pracovišť

Na základě hodnocení kritérií byly variantám přiděleny hodnoty kritérií.

	K1	K2	K3	K4
<b>Varianta 1a</b>	1	2	3	3
<b>Varianta 1b</b>	2	2	2	3
<b>Varianta 2</b>	3	3	2	1

Tab. 10 Zhodnocení variant

## 6.5 Určení významnosti kritérií

Významnost kritérií byla určena pomocí lineární závislosti  $q = 1 + 0,5 * v$ , kde  $v$  je počet voleb.

Porovnané páry kritérií			Počet voleb v	Pořadí	Váha významnosti q	
K1 K2	K1 K3	K1 K4	2,5	1	3,5	
		-	-			
	K2 K3	K2 K4	2,5	2	3,5	
		-	-			
			K3	0	4	1
			K4	1	3	2

Tab. 11 Určení významnosti kritérií

## 6.6 Celkový součet vážených indexů variant

Kritérium	Varianta 1a			
	Hodnota	Váha významnosti kritéria	Index změny	Vážený index kritéria
		q	$l_i$	$l_{ij}^*$
K1	1	3,5	1	3,5
K2	2	3,5	2	7
K3	3	1	3	3
K4	3	2	3	6
<b>Celkový součet vážených indexů kritéria <math>l_{ij}^*</math> Varianty 1a</b>				19,5

Tab. 12 Součet vážených indexů  $l_{ij}^*$  Varianta 1a

Kritérium	Varianta 1b			
	Hodnota	Váha významnosti kritéria	Index změny	Vážený index kritéria
		q	$l_i$	$l_{ij}^*$
K1	4	3,5	2	7
K2	2	3,5	2	7
K3	2	1	2	2
K4	2	2	3	6
<b>Celkový součet vážených indexů kritéria <math>l_{ij}^*</math> varianty 1b</b>				22

Tab. 13 Součet vážených indexů  $l_{ij}^*$  Varianty 1b

Kritérium	Varianta 2			
	Hodnota	Váha významnosti kritéria	Index změny	Vážený index kritéria
		q	$l_i$	$l_{ij}^*$
K1	4	3,5	3	10,5
K2	3	3,5	3	10,5
K3	3	1	2	2
K4	3	2	1	2
<b>Celkový součet vážených indexů kritéria <math>l_{ij}^*</math> varianty 2</b>				25

Tab. 14 Součet vážených indexů  $l_{ij}^*$  Varianty 2

## 6.7 Výsledek vícekritériální analýzy

Varianta	Celkový počet vážených indexů $l_{ij}^*$	Pořadí
1a	19,5	3
1b	22	2
2	25	1

**Tab. 15 Výsledek vícekritériální analýzy**

## 7. Návrh otočného stolu

Po výběru varianty pracoviště s otočným stolem je třeba navrhnout vyhovující stůl, který splní stanovené požadavky.

### 7.1 Požadavky na otočný stůl

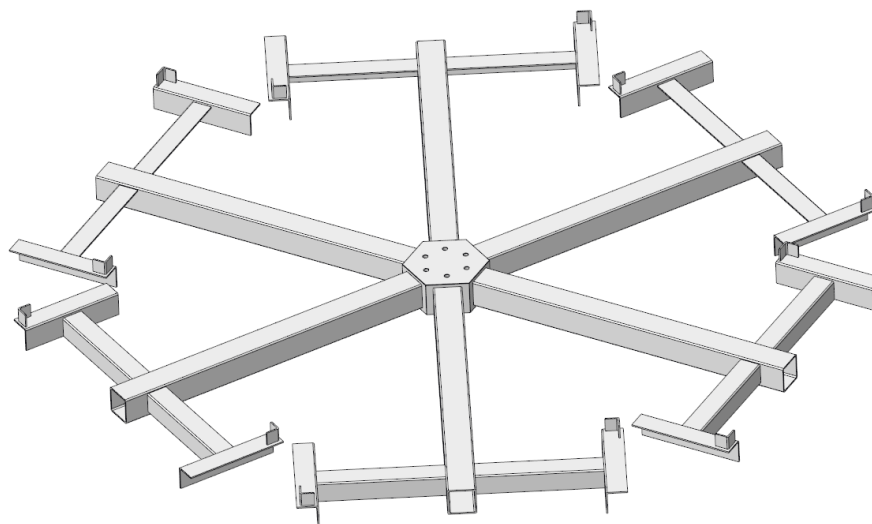
- Počet stanovišť pro laboratorní úlohy: 6
- Maximální hmotnost laboratorní úlohy: 5 kg
- Maximální nosnost: 30 kg
- Rozsah pohybu: 360°
- Úhel mezi stanovišti: 60°
- Maximální rozměry: 1200x900mm
- Maximální hmotnost stolu bez zátěže: 40 kg
- Maximální hmotnost stolu se zátěží: 70 kg
- Čas otočení mezi stanovišti: 3 s

### 7.2 Otočná část stolu

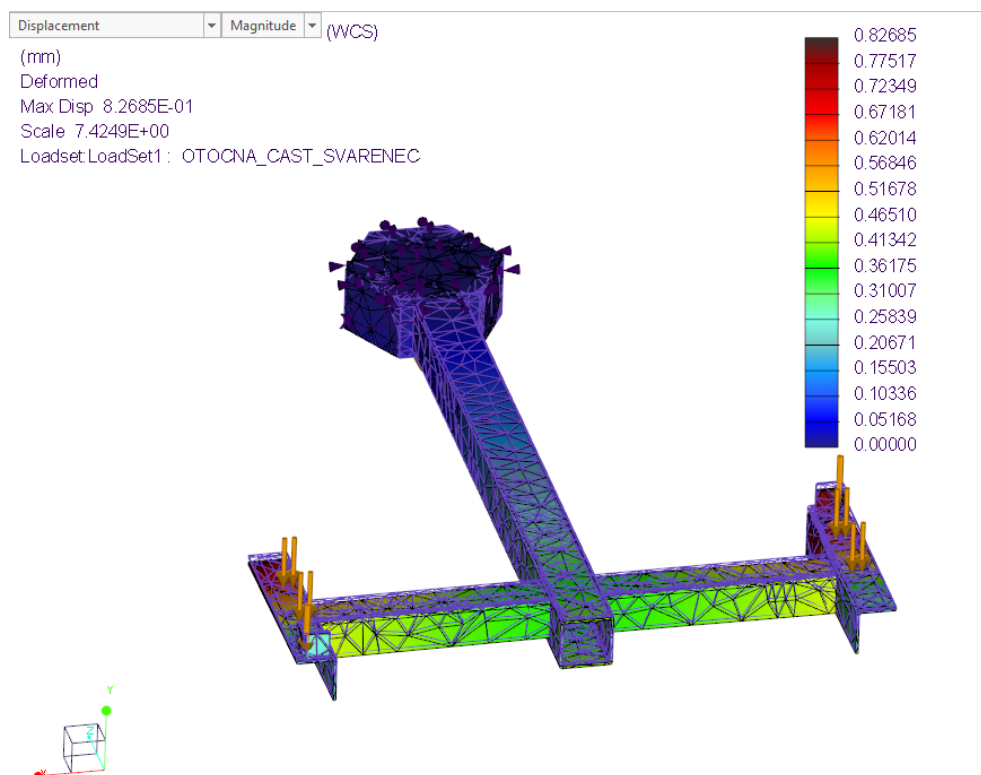
Při navrhování otočné části stolu byl důraz kladen na jednoduchost výroby a montáže, celkovou hmotnost a deformaci při plném zatížení. Celkové byly navrženy 3 varianty, jelikož u prvních dvou variant nebylo dosaženo uspokojivých výsledků.

#### 7.2.1 Varianta 1 otočné části

Varianta 1 se skládá ze svařovaných ocelových jeklů a profilů. U této varianty by není možné dosáhnout dostatečné přesnosti otočné části díky deformacím a napětí, které doprovází svařování materiálu. Hmotnost této varianty je 12,8 kg.

**Obr. 22 Varianta 1 otočné části stolu**

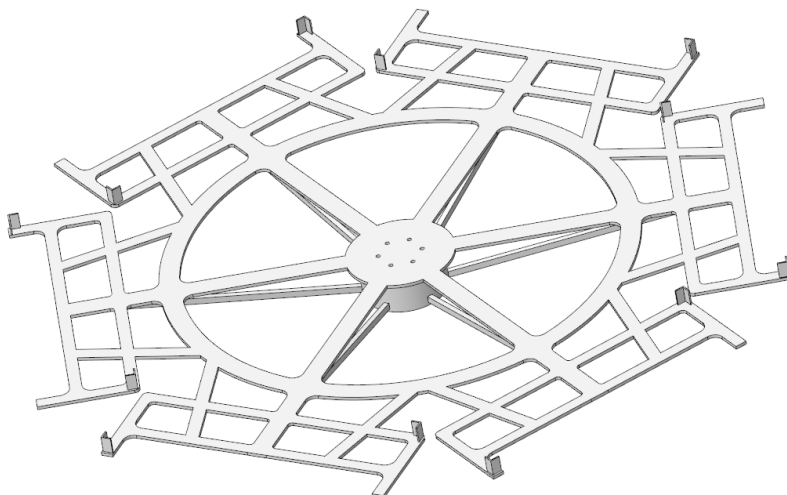
Pro zjednodušení simulace bylo použito pouze jedno rameno otočné části stolu, které bylo zatíženo 5 kg a vlastní tíhou. Maximální deformace dosahuje přibližně 0,82 mm.

**Obr. 23 Deformace po zatížení Varianta 1**



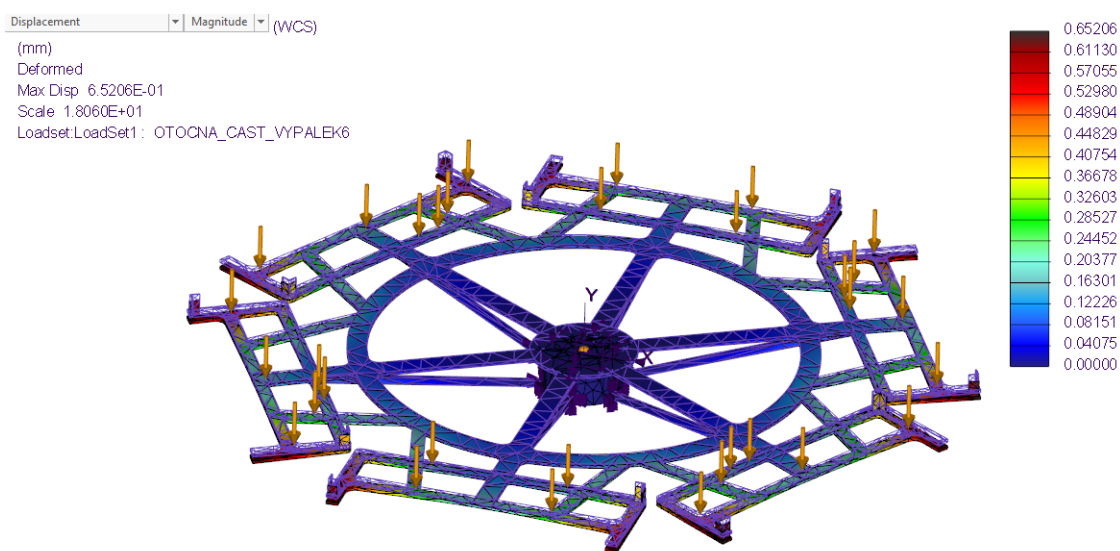
### 7.2.2 Varianta 2 otočné části stolu

Druhá navržená varianta se skládá z ocelového plechového výpalku, díky čemuž bylo možné do značné míry omezit svařování, ale nebylo však možné se svařování úplně vyhnout, neboť je potřeba výpalek vyztužit podpurnými žebry. Další problém byl v zachování nízké hmotnosti ocelového výpalku. Celková hmotnost této varianty je přibližně 14 kg.



Obr. 24 Varianta 2 otočné části stolu

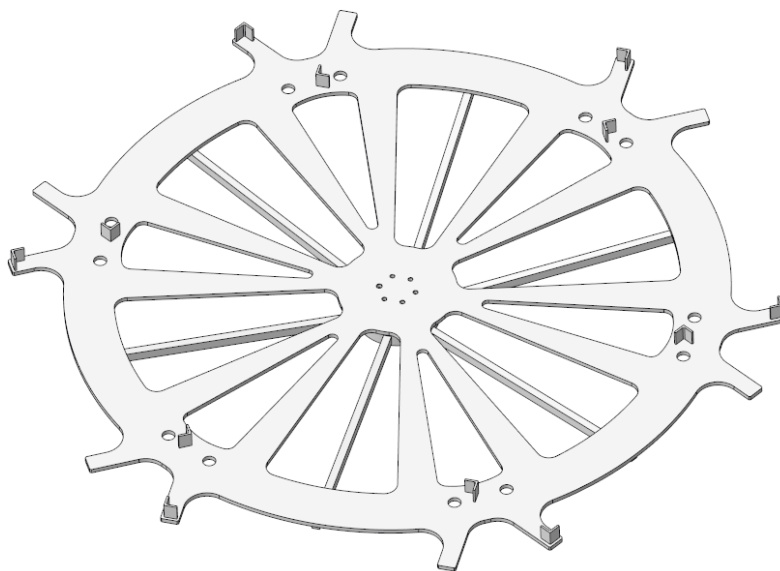
V simulaci celkové deformace bylo každé rameno otočné části bylo zatíženo 5 kg a vlastní tíhou. Maximální deformace dosahuje přibližně 0,65 mm.



Obr. 25 Deformace po zatížení Varianta 2

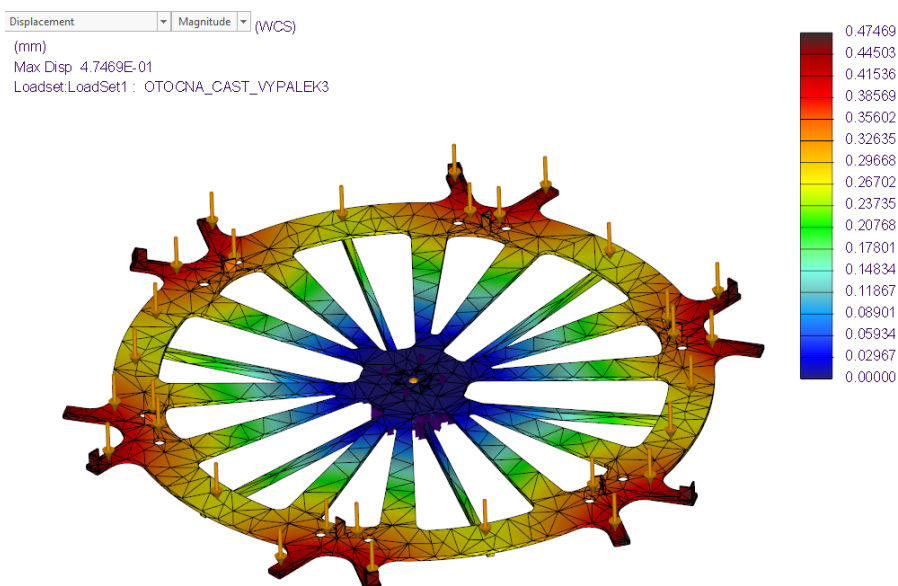
### 7.2.3 Varianta 3 otočné části stolu

Třetí navržená varianta byla zaměřena na snížení hmotnosti, proto byl pro výpalek místo ocelového plechu zvolen plech hliníkový. I v této variantě se nebylo možné vyhnout použití podpůrných žebér z důvodu snížení celkové deformace. Celková hmotnost třetí varianty je 10,3 kg.



Obr. 26 Varianta 3 otočné části stolu

V simulaci celkové deformace bylo každé rameno otočné části bylo zatíženo 5 kg a vlastní tíhou. Maximální deformace dosahuje přibližně 0,47 mm.



Obr. 27 Deformace po zatížení Varianta 3

Na základě porovnání parametrů hmotnosti a maximální deformace jednotlivých variant otočné části stolu byla zvolena Varianta 3 – hliníkový výpalek.

### 7.3 Finální model otočného stolu



Obr. 28 Finální model otočného stolu

#### 7.3.1 Parametry otočného stolu

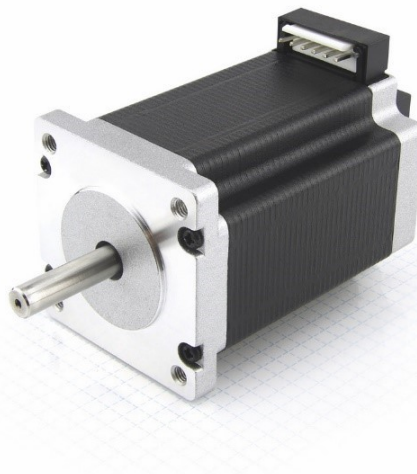
- Počet stanovišť pro laboratorní úlohy: 6
- Rozsah pohybu: 360°
- Úhel mezi stanovišti: 60°
- Čas otočení mezi stanovišti: 3 s
- Výška: 700 mm
- Průměr otočné části: 1050 mm
- Hmotnost: 32,9 kg
- Nosnost: 30 kg
- Výstupy pro IoT: 6 indukčních snímačů, enkodér krokového motoru

## 7.4 Pohonná jednotka otočného stolu

Pohonná jednotka byla vybrána na základě výpočtu, který určil potřebný krouticí moment a výstupní otáčky pohonné jednotky. Po zvážení různých typů a kombinací motorů a převodovek byla zvolena kombinace krokového motoru s planetovou převodovkou z důvodu nízké pořizovací ceny, dostatečné přesnosti a možnost sledování polohy pomocí inkrementálního enkodéru.

### 7.4.1 Krokový motor

Byl zvolen krokový motor SC6018L4204-ENO24K s inkrementálním enkodérem od společnosti Nanotec [13]. Technické údaje motoru jsou uvedeny v Tab. 13.

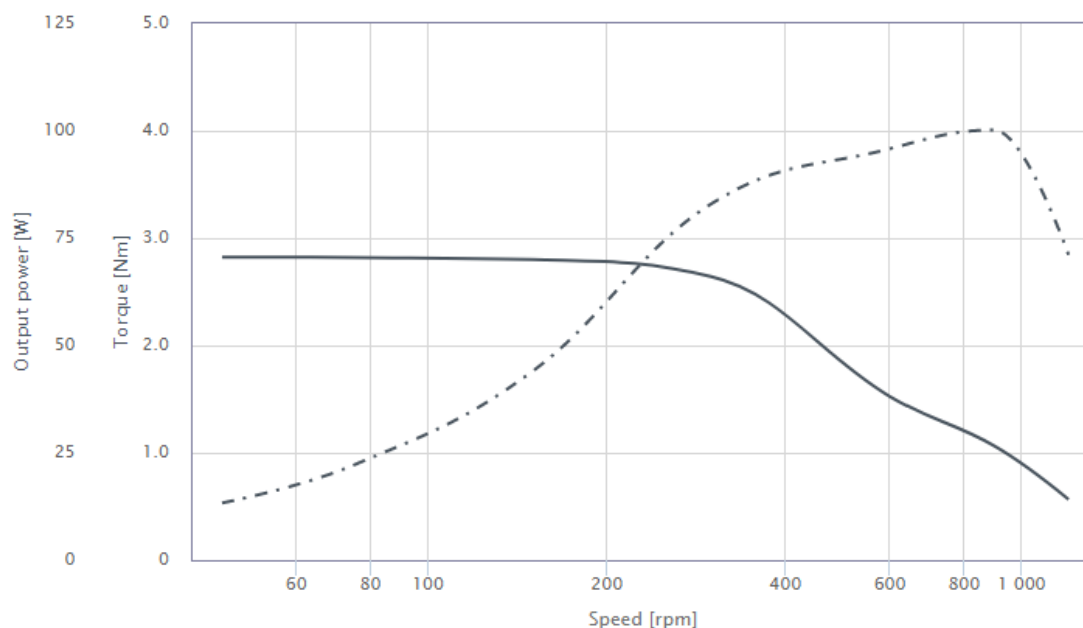


Obr. 29 Krokový motor SC6018L4204-ENO24K [13]

Parametr	Hodnota
Velikost	NEMA 24
Přidržený moment	3,54 N.m
Moment setrvačnosti rotoru	840 g.cm <sup>2</sup>
Typ enkodéru	Inkrementální
Rozlišení enkodéru	4000 pulsů na otáčku
Hmotnost	1,4 kg
Napájecí napětí	48 V
Cena	193 EURO

Tab. 16 Technické údaje motoru [13]

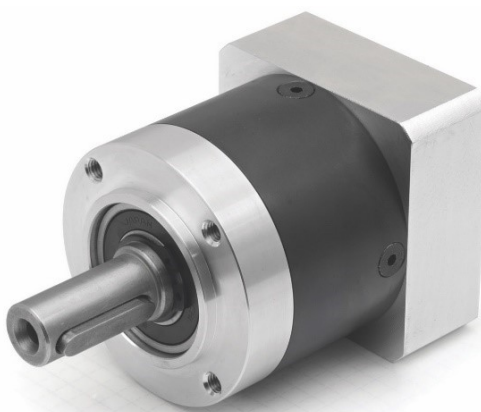
Výstupní moment krokového motoru lze určit pomocí závislosti otáček a výstupního momentu, kterou udává výrobce.



Obr. 30 Závislost momentu a výkonu na otáčkách [13]

#### 7.4.2 Planetová převodovka

Byla zvolena planetová převodovka GPLE60-1S-10 společnosti Nanotec [14]. Tento typ převodovky má kompaktní rozměry a vysokou přesnost a účinnost. Technické údaje převodovky jsou uvedeny níže v Tab. 14.



Obr. 31 Planetová převodovka PLE60-1S-10 [14]

Parametr	Hodnota
Převodový poměr	10
Max. výstupní krouticí moment	24 N.m
Jmenovitý výstupní moment	15 N.m
Moment setrvačnosti	6,5 kg.mm <sup>2</sup>
Účinnost	97%
Hmotnost	0,9 kg
Krytí	IP54
Velikost	NEMA 24
Provozní teplota	-25°C až +90°C
Cena	197 EURO

Tab. 17 Technické údaje převodovky [14]

### 7.4.3 Výpočet pohonné jednotky otočného stolu

Otočný stůl vykoná pohyb vždy v rozsahu 60° a skládá se ze zrychlení, ustálené rychlosti a zpomalení. Úhel pootočení  $\varphi$  je 60° nebo  $\pi/3$ , celkový čas pootočení  $t$  byl zvolen 3 s. Doba zrychlení a brzdění motoru byla určena jako 20% celkového času pootočení stolu, tedy čas zrychlení  $t_z$  0,6 s a čas brzdění  $t_b$  0,6 s.

#### Výpočet výstupní úhlové rychlosti pohonné jednotky:

$$\omega = \frac{\varphi}{t - (t_z + t_b)} \quad (7.1)$$

$$\omega = \frac{\frac{\pi}{3}}{3 - (0,6 + 0,6)}$$

$$\omega = 0,582 \text{ rad. s}^{-1}$$

$$\omega = 34,907 \text{ ot. min}^{-1}$$

#### Výpočet úhlového zrychlení:

Výpočet vychází ze zjištěné úhlové rychlosti a zvoleného času zrychlen.

$$\varepsilon_z = \frac{\omega}{t_z} \quad (7.2)$$

$$\varepsilon_z = \frac{0,582}{0,6}$$

$$\varepsilon_z = 0,97 \text{ rad. s}^{-2}$$

**Výpočet otáček krokového motoru:**

Neboť je pohonná jednotka vybavena planetovou převodovkou je třeba přepočítat otáčky motoru, podle níž se dá určit výstupní krouticí moment krokového motoru ze závislosti momentu na otáčkách udávaným výrobcem. Převodový poměr převodovky  $i$  je 12.

$$\omega_m = \omega \cdot i \quad (7.3)$$

$$\omega_m = 34,907 \cdot 10$$

$$\omega_m = 349,07 \text{ ot. min}^{-1}$$

**Výpočet krouticího momentu:**

Pro výpočet krouticího momentu pohonu  $M$  bylo zapotřebí určit momenty setrvačnosti rotujících součástí otočného stolu vůči ose rotace. Tato hodnota byla zjištěna pomocí CAD softwaru PTC Creo Parametric. Moment setrvačnosti otočné části stolu je  $J_s = 8,22 \text{ kg.m}^2$ , moment setrvačnosti hřídele je  $J_h = 4,659 \cdot 10^{-5} \text{ kg.m}^2$ . Také byly započítány momenty setrvačnosti rotoru krokového motoru  $J_M = 8,4 \cdot 10^{-5} \text{ kg.m}^2$  a planetové převodovky  $J_P = 6,5 \cdot 10^{-6} \text{ kg.m}^2$ . Do výpočtu byly započítány i účinnost převodovky  $\eta_p$  a účinnost ložiska  $\eta_l$ .

$$J_C = J_s + J_h + (J_M + J_P) \cdot i^2 \quad (7.3)$$

$$J_C = 8,22 + 4,659 \cdot 10^{-5} + (8,4 \cdot 10^{-5} + 6,5 \cdot 10^{-6}) \cdot 10^2$$

$$J_C = 8,235 \text{ kg.m}^2$$

$$M = J_C \cdot \varepsilon_Z \cdot \frac{1}{\eta_p \cdot \eta_l} \quad (7.4)$$

$$M = 8,235 \cdot 0,97 \cdot \frac{1}{0,97 \cdot 0,95}$$

$$M = 8,665 \text{ N.m}$$

Z tohoto výpočtu vyplývá, že u zvolené převodovky nebude překročen maximální výstupní krouticí moment. Pro kontrolu bude dále vypočten skutečný výstupní moment zvolené pohonné jednotky.

**Krouticí moment pohonné jednotky**

Krouticí moment motoru  $M_m$  byl určen pomocí diagramu závislosti momentu na otáčkách, který je uveden na Obr. 30.  $M_m$  je podle diagramu odhadován na hodnotu 2,5 N.m při 350 ot.min<sup>-1</sup>.



$$M_c = M_m \cdot i \cdot \eta_p \quad (7.5)$$

$$M_c = 2,5 \cdot 10 \cdot 0,97$$

$$M_c = 24,25 \text{ N.m}$$

$$M_c > M \quad (7.6)$$

$$24,25 \text{ N.m} > 8,665 \text{ N.m}$$

Krouticí moment pohonné jednotky je dostatečný pro provoz otočného stolu.

### **Výpočet redukováného momentu setrvačnosti na rotoru krokového motoru**

Je potřeba určit redukováný moment setrvačnosti na ose rotoru krokového motoru pro kontrolu rozběhového momentu krokového motoru.

$$J_{red} = \frac{J_c}{i^2} \quad (7.7)$$

$$J_{red} = 0,082 \text{ kg.m}^2$$

### **Výpočet rozběhového momentu motoru**

Rozběhový moment motoru byl vypočítán pro kontrolu, zda celkový rozběhový moment nepřesahuje maximální možný moment na krokovém motoru. Před výpočtem rozběhového momentu bylo také určeno úhlové zrychlení rotoru, které vychází z výpočtu otáček krokového motoru (7.3) a času zrychlení motoru  $t_z$ .

$$\varepsilon_m = \frac{\omega_m}{t_z} \quad (7.8)$$

$$\varepsilon_m = \frac{349,07}{0,6}$$

$$\varepsilon_m = 9,696 \text{ rad}^{-2}$$

$$M_{roz} = J_{red} \cdot \varepsilon_m \quad (7.9)$$

$$M_{roz} = 0,082 \cdot 9,696$$

$$M_{roz} = 0,798 \text{ N.m}$$

$$M_{roz} < M_m \quad (7.10)$$

$$0,798 \text{ N.m} < 2,5 \text{ N.m}$$

Rozběhový moment je nižší, než moment motoru, tudíž zvolený krokový moment vyhovuje kontrole na rozběhový moment.

## 7.5 Uložení vertikální osy stolu

Pro volbu vhodného typu uložení pohonné jednotky se vychází z analýzy zatížení, kterou působí na uložení otočná část stolu. Jelikož má otočná část stolu 6 stanovišť pro laboratorní úlohy, všechny stanoviště nemusí být obsazeny a jednotlivá pracoviště se od sebe mohou lišit hmotností, tudíž i momenty setrvačnosti. Z toho plyne, že otočná část stolu bude na uložení působit silami v axiálním i radiálním směru. Z těchto důvodů bylo zvoleno uložení, ve kterém bude hřídel uložen ve dvouřadém kuličkovém ložisku s kosoúhlým stykem.

Dvouřadá ložiska s kosoúhlým přenáší axiální síly v obou směrech. Spojnice styčných bodů se protínají s osou ložiska vně ložiska, takže jedno ložisko může zachycovat i klopné momenty, takže jedno ložisko může tak nahradit uložení ve dvou ložiskách. [15]

Bylo zvoleno ložisko 3305 A-2Z společnosti SKF, které má kryty na obou stranách proti vnikání nečistot do ložiska. [16]

Parametr	Hodnota
Vnější průměr	62 mm
Vnitřní průměr	25 mm
Šířka	25,4 mm
Dynamická únosnost	34 kN
Statická únosnost	20,4 kN

**Tab. 18 Technické parametry ložiska [16]**

Ložisko je nalisováno na hřídel, vnější kroužek ložiska je uložen v ložiskovém domku a zajištěn pomocí protipříruby. Vnitřní kroužek ložiska je ze spodní stany zajištěn pomocí pojistné matice se čtyřmi drážkami MATICE M25 x 1,5 ISO 2982 [17] a pojistné podložky PODLOŽKA MB 5 ČSN 02 3640 [17].

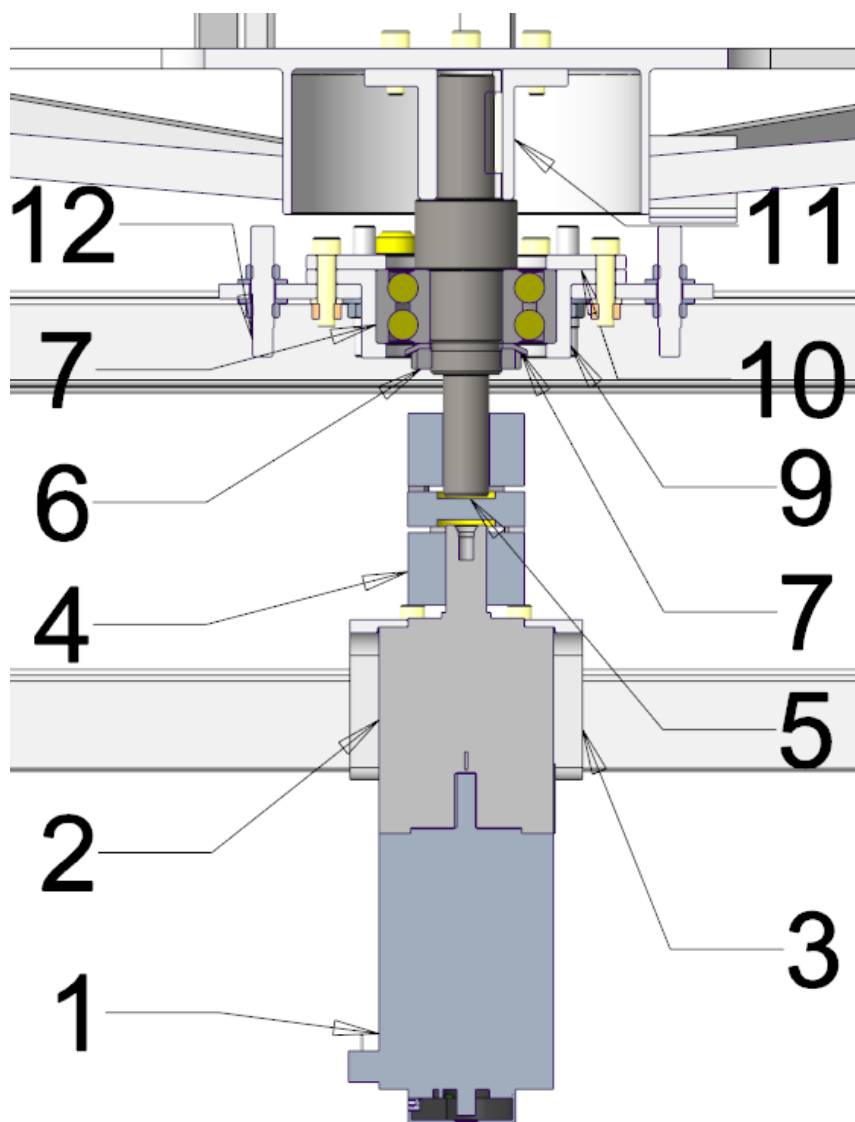
Ložiskový domek je přišroubován pomocí pěti šroubů ŠROUB M6 x 16 ISO 4762 [17] a zajištěn kolíkem o průměru 8 mm. Na hřídeli je také náboj, který pomocí hřídelového pera PERO 8e7 x 7 x 30 ČSN 02 2562 [17] přenáší krouticí moment na otočnou část stolu. Náboj je spojen s otočnou částí stolu pomocí pěti šroubů ŠROUB M6 x 16 ISO 4762 [17] a zajištěn kolíkem o průměru 8 mm.

Pro zajištění přenosu krouticího momentu pohonné jednotky byla zvolena hřídelová spojka. Konkrétně se jedná o pružnou bezvůlovou spojku s vrtáním H7, s drážkou pro pero a 2 stavěcími šrouby, typ C19/24FB - 19/24KS92 [18]. Tento typ spojky je schopen vyrovnat drobné nesouososti a úhlové odchylky mezi pohonnou jednotkou a spojovaným hřídelem.

Parametr	Hodnota
Typ	C19/24FB - 19/24KS92
Jmenovitý moment	10 N.m
Maximální moment	20 N.m
Výrobce	T.E.A. TECHNIK s.r.o.

Tab. 19 Techniké údaje spojky [18]

Řez uložením vertikální osy otočného stolu je zobrazen níže.



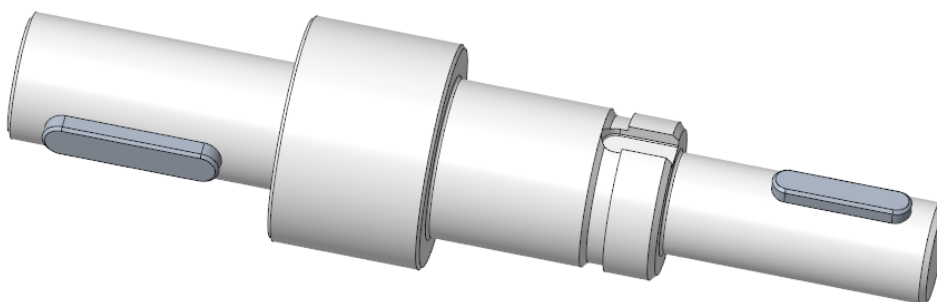
Obr. 32 Uložení vertikální osy stolu

Název	Pozice
Krokový motor	1
Planetová převodovka	2
Držák pohonu	3
Spojka	4
Hřídel otočného stolu	5
KM matice	6
MB podložka	7
Ložisko	8
Příruba	9
Protipříruba	10
Otočná část	11
Indukční senzor	12

Tab. 20 Popis uložení vertikální osy stolu

### 7.5.1 Kontrola hřídelových per

Pro správný návrh pohonné jednotky je také potřeba provést kontrolu celkem 3 hřídelových per, která přenášejí krouticí moment od převodovky na otočnou část stolu. Pro výpočet byly použity vztahy a hodnotu dovoleného tlaku  $p_D$  a dovoleného namáhání na střih  $\tau_{DS}$  z výukových skript [15]. Hodnoty hloubky drážek v náboji  $t_1$  jsou převzaty ze strojnických tabulek [17],  $d$  značí průměr hřídele. Šířka pera je značena jako  $b$ .



Obr. 33 Pohled na hřídelová pera

#### Výpočet minimální délky pera 1

Výpočet minimální délky pera PERO 6e7 x 6 x 28 ČSN 02 2562 [15] byl proveden s ohledem na dovolené napětí.

$$l' = \frac{\frac{M \cdot 1000}{\frac{d}{2} + \frac{t_1}{2}}}{p_D \cdot t_1} \quad (7.11)$$

$$l' = \frac{\frac{8,97 \cdot 1000}{\frac{20}{2} + \frac{2,5}{2}}}{100 \cdot 2,5}$$

$$l' = 3,081 \text{ mm}$$

$$l_{min} = l' + b \quad (7.12)$$

$$l_{min} = 3,081 + 6$$

$$l_{min} = 9,081 \text{ mm}$$

$$l_{min} \leq l \quad (7.13)$$

$$9,081 \text{ mm} \leq 28 \text{ mm}$$

Délka hřídelového pera 1 je vyhovuje kontrole.

### Kontrola pera 1 na stříh

Kontrola pera PERO 6e7 x 6 x 28 ČSN 02 2562 [15] byla provedena s ohledem na dovolené namáhání na stříh.

$$\tau_S = \frac{\frac{M \cdot 1000}{\frac{d}{2}}}{l \cdot b} \quad (7.14)$$

$$\tau_S = \frac{\frac{8,97 \cdot 1000}{\frac{20}{2}}}{28 \cdot 6}$$

$$\tau_S = 1,032 \text{ MPa}$$

$$\tau_S \leq \tau_{DS} \quad (7.15)$$

$$1,032 \text{ MPa} \leq 30 \text{ MPa}$$

Pero 1 vyhovuje kontrole na stříh.

### Výpočet minimální délky pera 2

Výpočet minimální délky pera PERO 5e7 x 5 x 22 ČSN 02 2562 [15] byl proveden s ohledem na dovolené napětí.

$$l' = \frac{\frac{M \cdot 1000}{\frac{d}{2} + \frac{t_1}{2}}}{p_D \cdot t_1} \quad (7.16)$$

$$l' = \frac{\frac{8,97 \cdot 1000}{\frac{16}{2} + \frac{2,1}{2}}}{100 \cdot 2,1}$$

$$l' = 3,081 \text{ mm}$$

$$l_{min} = l' + b \quad (7.17)$$

$$l_{min} = 4,559 + 5$$

$$l_{min} = 9,559 \text{ mm}$$

$$l_{min} \leq l \quad (7.18)$$

$$9,559 \text{ mm} \leq 22 \text{ mm}$$

Délka hřídelového pera 2 je vyhovuje kontrole.

### Kontrola pera 2 na stříh

Kontrola pera PERO 5e7 x 5 x 22 ČSN 02 2562 [15] byla provedena s ohledem na dovolené namáhání na stříh.

$$\tau_S = \frac{\frac{M \cdot 1000}{\frac{d}{2}}}{l \cdot b} \quad (7.19)$$

$$\tau_S = \frac{\frac{8,97 \cdot 1000}{\frac{16}{2}}}{22 \cdot 6}$$

$$\tau_S = 1,641 \text{ MPa}$$

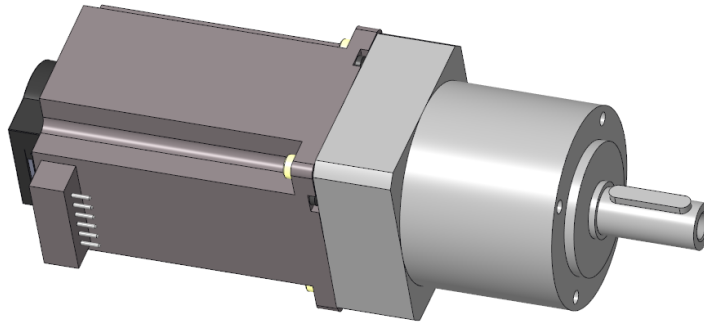
$$\tau_S \leq \tau_{DS} \quad (7.20)$$

$$1,641 \text{ MPa} \leq 30 \text{ MPa}$$

Pero 2 vyhovuje kontrole na stříh.

### 7.5.2 Kontrola hřídelového pera převodovky

Při kontrole hřídelového pera převodovky PERO 5e7 x 5 x 25 ČSN 02 2562 [15] byl dodržen stejný postup jako při výpočtu hřídelových per 1 a 2.



Obr. 34 Pohled na pero převodovky

**Výpočet minimální délky pera 2**

$$l' = \frac{\frac{M \cdot 1000}{\frac{d}{2} + \frac{t_1}{2}}}{p_D \cdot t_1} \quad (7.21)$$

$$l' = \frac{\frac{8,97 \cdot 1000}{\frac{14}{2} + \frac{2,1}{2}}}{100 \cdot 2,1}$$

$$l' = 5,126 \text{ mm}$$

$$l_{min} = l' + b \quad (7.22)$$

$$l_{min} = 5,126 + 5$$

$$l_{min} = 10,126 \text{ mm}$$

$$l_{min} \leq l \quad (7.23)$$

$$10,126 \text{ mm} \leq 25 \text{ mm}$$

Délka hřídelového pera převodovky je vyhovuje kontrole.

**Kontrola pera 2 na střih**

Kontrola pera PERO 5e7 x 5 x 22 ČSN 02 2562 [15] byla provedena s ohledem na dovolené namáhání na střih.

$$\tau_S = \frac{\frac{M \cdot 1000}{\frac{d}{2}}}{l \cdot b} \quad (7.24)$$

$$\tau_S = \frac{\frac{8,97 \cdot 1000}{\frac{14}{2}}}{25 \cdot 5}$$

$$\tau_S = 1,65 \text{ MPa}$$



$$\tau_S \leq \tau_{DS} \quad (7.25)$$

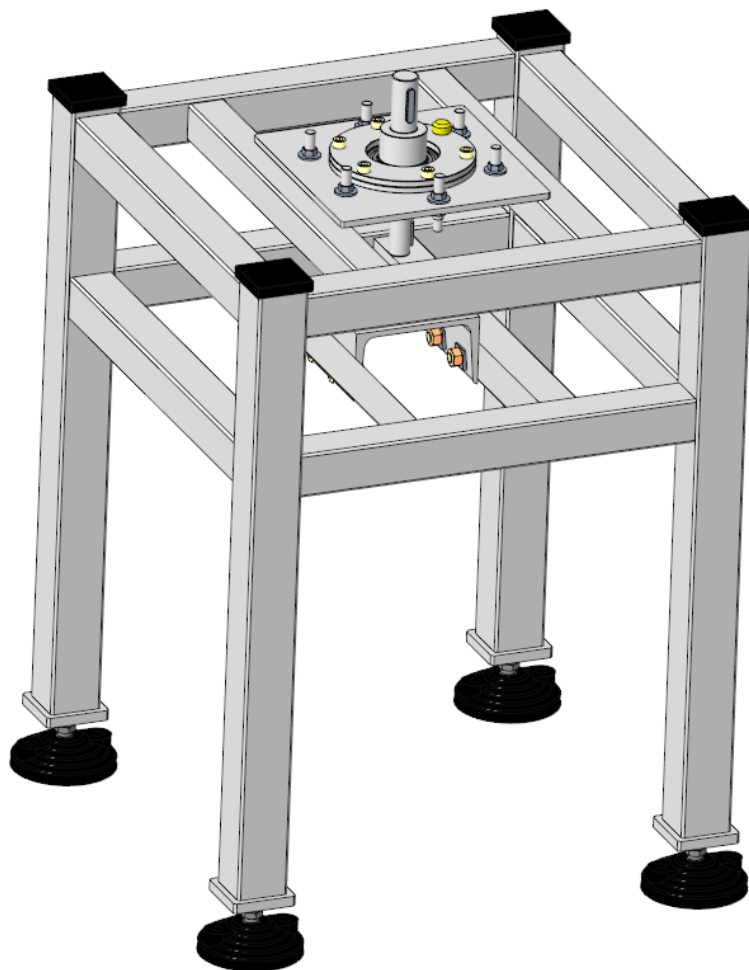
$$1,65 \text{ MPa} \leq 30 \text{ MPa}$$

Pero převodovky vyhovuje kontrole na střih.

## 7.6 Rám otočného stolu

Rám otočného stolu se skládá ze svařence z normalizovaných ocelových jeleků a profilů z konstrukční oceli S2355JR, která je vhodná ke svařování. Konkrétně se jedná o čtvercové jekly 40 x 40 x 2 mm, 35 x 35 x 2 mm a L-profil 30 x 30 x 3 mm. Pohonná jednotka je připevněna na U-profilu UPE-100. Ložiskový domek je přišroubován k plechu o tloušťce 6 mm.

Rám stolu je také vybaven šesti indukčními senzory IPS-8 M8x1 pro určení přítomnosti a typu právě připravené laboratorní úlohy. Tato informace je společně s daty z enkodéru motoru využita při aplikaci internetu věcí na pracovišti.



Obr. 35 Rám otočného stolu

Pro ukotvení stolu k podlaze pracoviště byl zvolen typ polohovací nohy, který umožňuje připevnění k podlaze pracoviště. Jedná se o typ LV.F-80-14-M8x43 dodávaný společností Eles + GANTER [19].

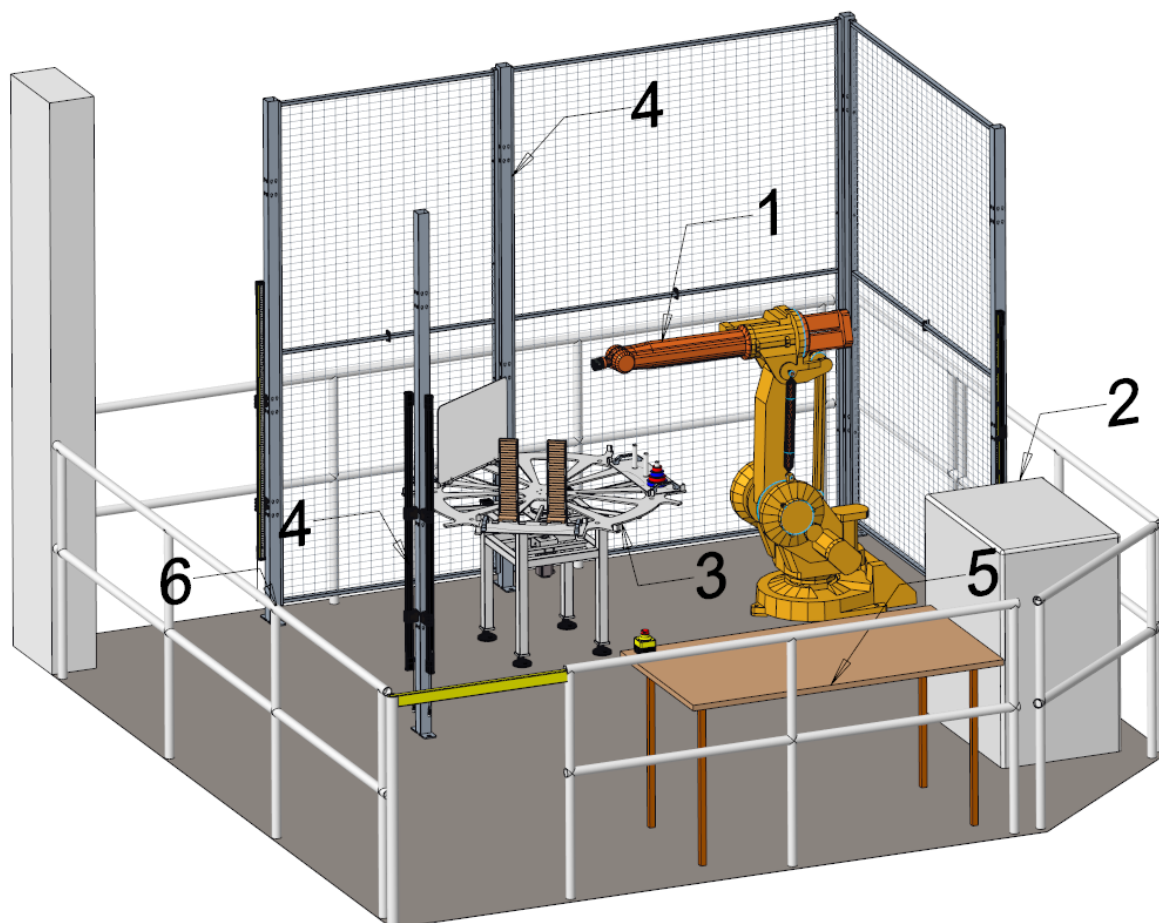


**Obr. 36 Polohovací noha LV.F-80 [19]**

Základna nohy je vyrobena z technopolymeru na bázi polyamidu vyztuženým skelnými vlákny, nastavovací šroub je z pozinkované oceli. Připevnění k podlaze je dosaženo po proražení plastové membrány dvou protilehlých otvorů a následným přišroubováním pomocí dvou šroubů M8.

## 8. Finální verze pracoviště

V této kapitole bude popsána finální verze pracoviště v univerzitním centru robotiky, která vychází z výběru optimální varianty, tedy varianta s otočným stolem. Je zahrnut popis jednotlivých komponentů, dispoziční řešení, zabezpečení pracoviště a logika pracoviště s ohledem na ovládání robotu a programování daných laboratorních úloh.



Obr. 37 Finální varinata pracoviště

Název	Pozice
ABB IRB 1400	1
Řídicí systém S4C+	2
Otočný stůl	3
Zabezpečení pracoviště	4
Pomocný stůl	5
Zábradlí	6

Tab. 21 Popis pracoviště

## 8.1 Použité komponenty

Při návrhu pracoviště byl kladen důraz na využití co nejvíce komponentů, které už byly koupeny a nacházejí se v univerzitním centru robotiky. Jedním z těchto komponent, které je možné použít na tomto pracovišti jsou čtyři efektory společnosti Schunk.

### 8.1.1 Schunk PGN-plus 80-1

Jedná se o pneumatický paralelní dvoučelistový efektor s velkými uchopovacími silami a momenty.



Obr. 38 Schunk PGN-plus 80-1 [21]

Parametr	Hodnota
Posuv na čelist	8 mm
Uchopovací síla	415 N
Doporučené zatížení	2,1 kg
Nominální tlak	6 bar
Maximální tlak	8 bar
Maximální délka čelisti	110 mm
Hmotnost	0,37 kg

Tab. 22 Parametry efektoru PGN-plus 80-1 [21]

### 8.1.2 Schunk GWB-64

Jedná se o pneumatický dvoučelistový angulární efektor s velkými uchopovacími silami a vysokými momenty.



Obr. 39 Schunk GWB-64 [22]

Parametr	Hodnota
Úhel otevření	90°
Uchopovací moment	27,45 N.m
Doporučené zatížení	2,2 kg
Nominální tlak	4 bar
Maximální tlak	6,5 bar
Maximální délka čelisti	80 mm
Hmotnost	0,43 kg

Tab. 23 Parametry efektoru GWB-64

### 8.1.3 Schunk PZN-plus 64-1

Jedná se o pneumatický tříprstý středící efektor s velkými uchopovacími silami a vysokými momenty.



Obr. 40 Schunk PZN-plus 64-1 [23]

Parametr	Hodnota
Posuv na čelist	6 mm
Uchopovací síla	580 N
Doporučené zatížení	2,9 kg
Nominální tlak	6 bar
Maximální tlak	8 bar
Maximální délka čelisti	80 mm
Hmotnost	0,43 kg

Tab. 24 Parametry efektoru PZN-plus 64-1 [23]

#### 8.1.4 Schunk PGF 80 AS

Jedná se o pneumatický paralelní efektor s velkými uchopovacími silami a vysokými momenty.



Obr. 41 Schunk PGF 80 AS [24]

Parametr	Hodnota
Posuv na čelist	16,5 mm
Uchopovací síla	760 N
Doporučené zatížení	2,8 kg
Nominální tlak	6 bar
Maximální tlak	6,5 bar
Maximální délka čelisti	80 mm
Hmotnost	1,25 kg

Tab. 25 Parametry efektoru PGF 80 AS [24]

### 8.1.5 Systém rychlé výměny Schunk SHK-040-000-000

Neboť je možné na pracovišti využít několik různých efektorů, je potřeba zajistit rychlou výměnu. Z důvodu snížení nákladů byl zvolen manuální systém výměny Schunk SHK-040 [25], který je kompatibilní s interface robotu ABB IRB 1400.



Obr. 42 Schunk SHK-040-000-000 [25]

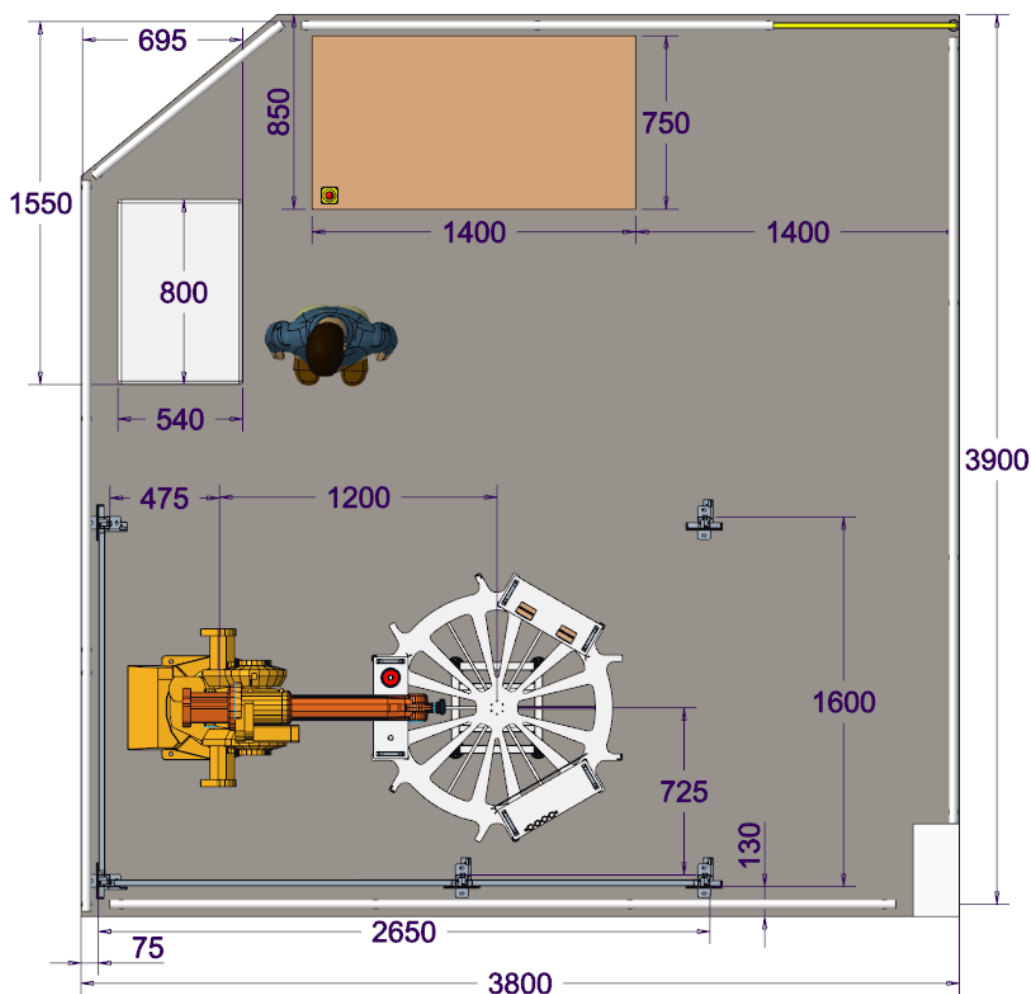
Parametr	Hodnota
Doporučené zatížení	9 kg
Hmotnost	0,215 kg
Maximální zatěžovací síla	700 N
Maximální zatěžovací moment	45 Nm
Počet otvorů pro pneumatiku	4

Tab. 26 Parametry Schunk SHK-040-000-000 [25]

## 8.2 Dispoziční řešení pracoviště

Pracoviště obsahuje průmyslový robot, řídicí jednotku robotu, otočný stůl, pomocný pevný stůl a bezpečnostní vybavení, které se skládá z bezpečnostního plotu a světelných závor.





Obr. 43 Dispoziční řešení pracoviště

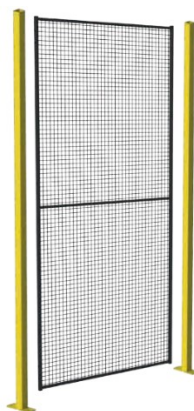
### 8.3 Zabezpečení pracoviště

Z důvodu přítomnosti průmyslového robotu ABB IRB 1400, který je schopen vyvinout vysokých rychlostí pohybu, což jej činí potenciálně velice nebezpečným je nutné zabránit jakékoli možnosti kontaktu osob s tímto robotem.

Pracoviště obsahuje ochranné zábradlí, které by mělo zabránit přístupu nepovolaných osob na pracoviště během provozu. Tento způsob zabezpečení není vyhovující, neboť úplně nezabraňuje přístupu do pracoviště. Je potřeba provést více bezpečnostních opatření, aby se předešlo nehodám na pracovišti.

Pracoviště se nachází v univerzitním centru robotiky, kde probíhá výuka a s ní spojený pohyb studentů kolem pracoviště do jednotlivých učeben. Z tohoto důvodu je nutné vybavit pracoviště ochranným ocelovým oplocením s pletivem, který spolehlivě zabrání jakémukoli možnému kontaktu s robotem. Volím stavebnicový systém Axelent X-Guard [26], konkrétně kombinaci panelů s pletivem a sloupků. Výška oplocení byla zvolena 2300 mm, oplocení se

skládá z pěti sloupků P11-230 [26], dvou panelů W322-220150 [26] o šířce 1500 mm a jednoho panelu W322-220100 [26] o šířce 1000 mm. Sloupky mají více montážních otvorů, což umožňuje montáž dalšího bezpečnostního zařízení.



**Obr. 44 Oplocení Axelent X-Guard [26]**

Vzhledem k možné výměně efektorů nebo laboratorních úloh před začátkem programování robotu je nutné zajistit přístup k robotu a také k otočnému stolu. Z tohoto důvodu zůstala část pracoviště otevřená a namísto bezpečnostního plotu byly umístěny bezpečnostní světelné závěsy SICK deTec / Typ 2 [27]. Tyto světelné mříže se skládají z vysílače C4C-SA12010A10000 [27] a přijímače C4C-EA12010A10000 [27].

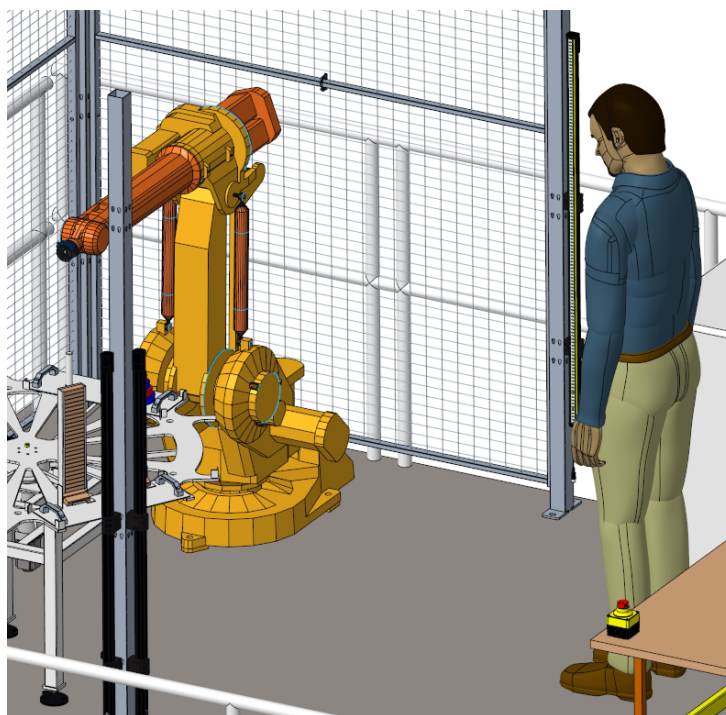


**Obr. 45 Sick deTec / Typ 4 [27]**

Parametr	Hodnota
Snímací dosah	10 m
Chráněná výška	1200 mm
Rozlišení	14 mm
Provozní okolní teplota	0°C až +55°C
Napájecí napětí	24 V

**Tab. 27 Parametry Sick deTec / Typ 2 [27]**

Pro případ nehody je pracoviště vybaveno také nouzovým Stop tlačítkem SICK ES21-SA10E1 [28], které je taky napájeno 24 V. Při spuštění bezpečnostního tlačítka nebo sepnutí bezpečnostní světelné mříže dojde k okamžitému zatavení robotu a otočného stolu.



Obr. 46 Zabezpečení pracoviště

## 8.4 Logika pracoviště

V této podkapitole bude popsána posloupnost činností na pracovišti a logika fungování celého pracoviště.

### 8.4.1 Posloupnost činností

- 1) Student přichází na pracoviště
- 2) Podle potřeby se před spuštěním řídicího systému provede výměna efektoru robotu nebo výměna laboratorní úlohy
- 3) Spouští se řídicí systém robotu S4C+
- 4) Pomocí Windows PC se nastaví otočný stůl do požadované polohy
- 5) V případě offline programování student pomocí diskety načte svůj program do řídicí jednotky. V případě online programování student použije pro programování teach-pendant, který je součástí robotu.
- 6) Spuštění vytvořeného programu pro danou laboratorní úlohu v manuálním krokovacím režimu se sníženými rychlostmi pohybu robotu
- 7) Spuštění vytvořeného programu v automatickém režimu

### 8.4.2 Logika pracoviště

Vzhledem k tomu, že není možné připojit sériovou linkou PC s řídicím systémem S4C+, který se nachází na pracovišti z důvodů, které byly rozebrány výše je třeba navržení alternativy v logice řízení pracoviště.

Robot ABB IRB 1400 je tedy řízen pouze pomocí řídicího systému S4C+. Existují dvě možnosti programování daného robotu a těmi jsou výše zmíněné online programování pomocí teach-pendantu nebo offline programování a načtení programu s RAPID kódem pomocí diskety 3,5".

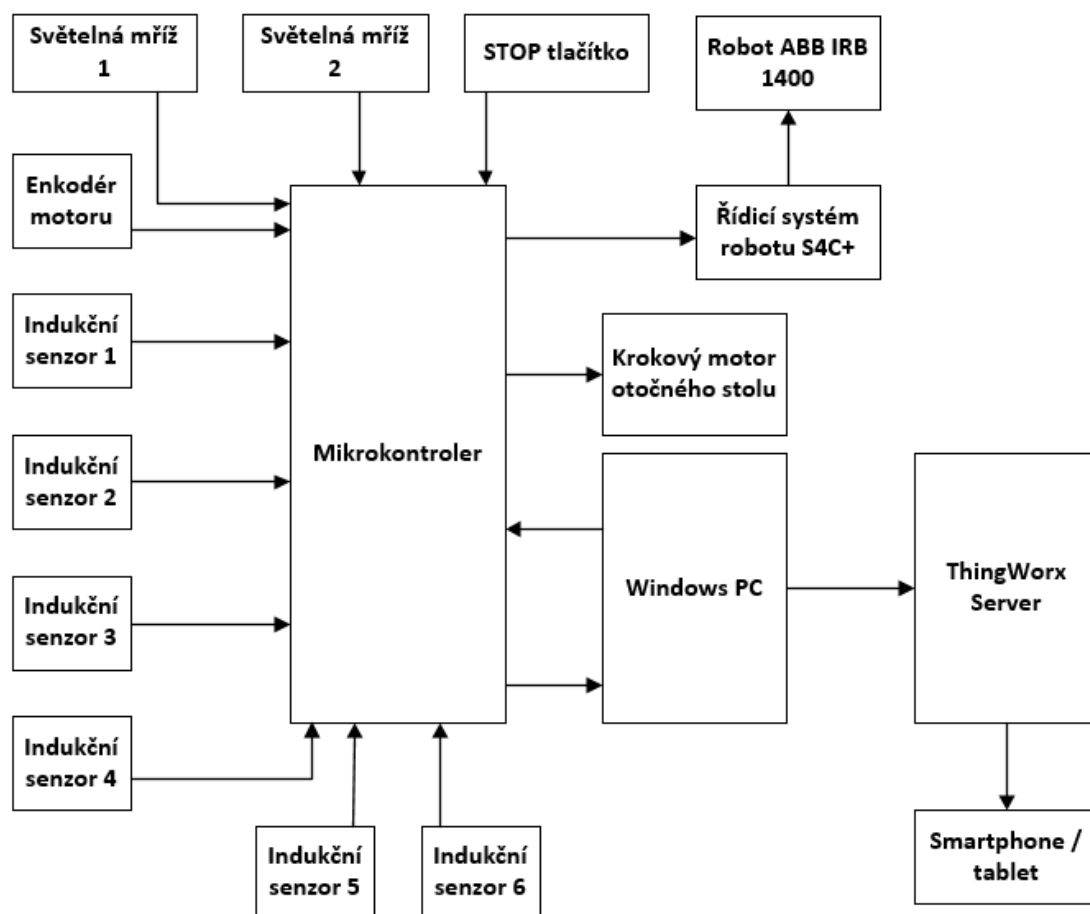
Pohyb otočného stolu je přes řízen přes Windows PC, který posílá instrukce do mikrokontroleru, kde jsou zpracovány a následně odeslány do pohonné jednotky otočného stolu.

Informace ze šesti indukčních senzorů, které poskytují informaci o tom, která laboratorní úloha je právě připravena v poloze před robotem je odeslána na mikrokontroler pomocí analogového signálu, dále se zpracuje v počítači v softwaru ThingWorx a pošle na ThingWorx Server. Tuto informaci je pak v reálném čase možno sledovat pomocí smartphonu nebo tabletu. Stejným způsobem jsou zpracovány a odesílány informace z enkodéru krokového motoru do mikrokontroleru, dále do PC a na ThingWorx Server. Díky tomuto spojení je možné sledovat aktuální polohu a rychlost otáčení otočného stolu.

Obě dvě bezpečnostní světelné mříže jsou připojeny na mikrokontroler, který v případě spuštění jednoho z těchto bezpečnostních senzorů posílá signál do řídicí jednotky robotu, který zastaví robot a také dá signál k zastavení otočného stolu. K restartu bezpečnostního systému, který umožní pokračovat v práci slouží Windows PC.

Na pracovišti se také nachází pevný stůl, který slouží pro odložení nepoužívaných efektorů a nachází se na něm PC a bezpečnostní tlačítko.

Pro lepší představu je zobrazena logika pracoviště na blokovém schématu níže.



Obr. 47 Logika pracoviště

## 9. Návrh laboratorních úloh

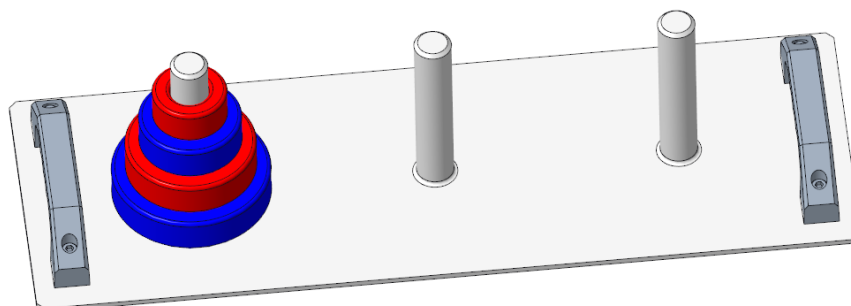
Při návrhu laboratorních úloh se vychází z analýzy možností a obvyklých aplikací robotu ABB IRB 1400. Všechny laboratorní úlohy jsou umístěny na společné platformě, která se skládá z ocelového plechu o tloušťce 3 mm a rozměrech 150 x 440 mm.

### 9.1 Hanojské věže

Hanojské věže jsou logickým hlavolamem, který má tři sloupky a několik kamenů rozdílných velikostí. Cílem tohoto hlavolamu je přesunout všechny kameny z jednoho sloupku na poslední s cílem dosažení kuželovitého tvaru. Vždy se přesouvá jeden kámen, přičemž nelze umístit větší kámen na nižší kámen.

Tato úloha simuluje Pick and Place aplikace a také umožňuje procvičování algoritmů.

K této úloze byl vypracován video-návod, který posluchačům ukáže správné řešení úlohy pomocí rozšířené reality. Tento návod je dostupný pomocí aplikace ThingWorx View [20]. Aplikaci lze zdarma nahrát na smartphone nebo tablet a slouží pro naskenování markeru, umístěném na dané laboratorní úloze.



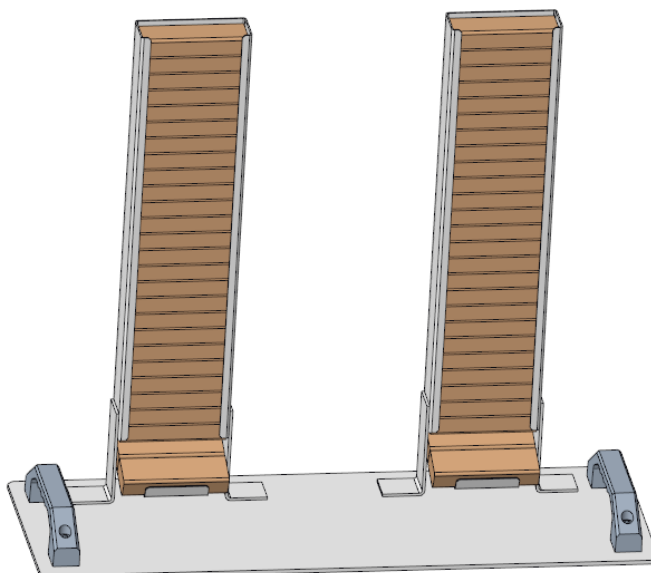
Obr. 48 Hanojské věže

### 9.2 Jenga

Tato laboratorní úloha obsahuje 54 dřevěných kvádrů o rozměrech 15 x 25 x 75 mm. Tyto kvádry jsou umístěny ve dvou podavačích a lze je přestavět do libovolných tvarů a vzorů. Jedna z možných úloh je postavení věže z osmnácti pater po třech kvádrech.

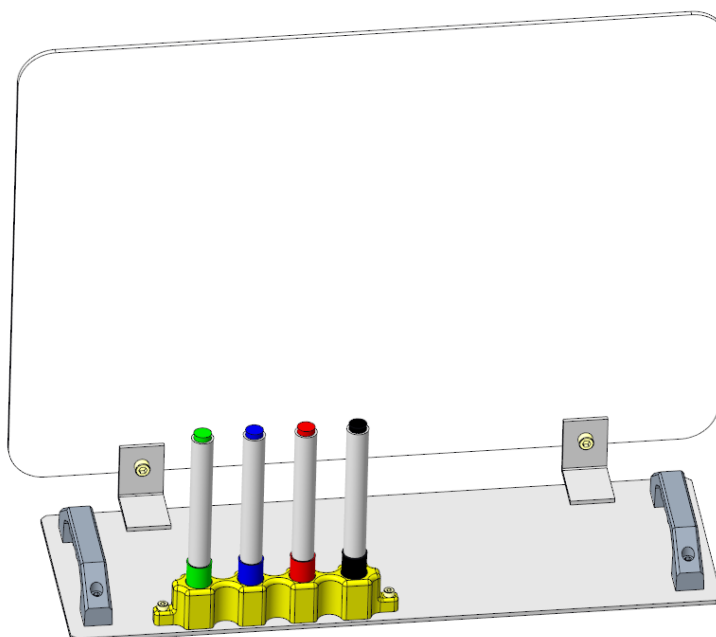
Tato úloha do určité míry simuluje paletizaci a také Pick and Place aplikace.

K této úloze byl také vypracován video-návod, který posluchačům ukáže správné řešení úlohy pomocí rozšířené reality. Tento návod je možné spustit pomocí aplikace ThingWorx View [20].

**Obr. 49 Jenga**

### 9.3 Úloha s fixy

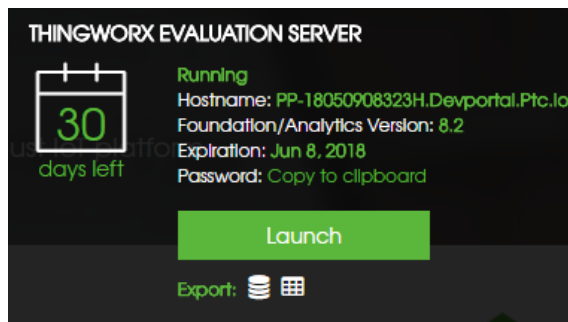
Neboť je robot ABB IRB 1400 často využíván pro svařování obloukem byla také navržena úloha, která tuto aplikaci v omezené míře simuluje. Jedná se o tvorbu trajektorie pomocí fixů na stíratelnou tabulku formátu A3. V této konkrétní úloze je také možnost simulace výměny efektorů skrze výměnu fixů umístěných ve stojanu, který je vytvořen metodou 3D tisku.

**Obr. 50 Úloha s fixy**



## 10. Implementace internetu věcí a rozšířené reality

Pro využití internetu věcí a rozšířené reality ve výuce při práci s laboratorními úlohami byla zvolena platforma ThingWorx. V době vypracování této práce nebyl pro dostupný server ani licence pro Katedru robotiky, což vedlo k určitým omezením a tato část diplomové práce byla zpracována ve zkušební verzi.

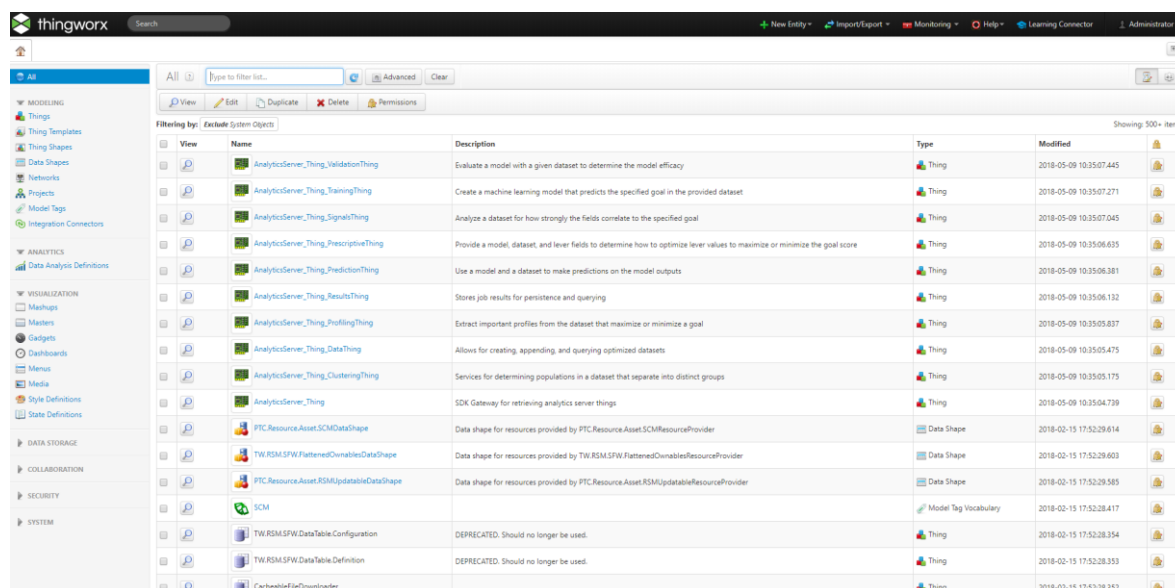


Obr. 51 ThingWorx Server

### 10.1 ThingWorx Foundation

ThingWorx Foundation je platforma pro vývojáře pro tvorbu aplikací IoT. Umožňuje tvorbu a připojení věcí a také tvorbu IoT aplikací. ThingWorx Foundation také zajišťuje propojení mezi ostatními komponenty platformy ThingWorx.

Při tvorbě diplomové práce byl používán také ThingWorx Composer, který je součástí ThingWorx Foundation využit pro tvorbu objektů tzv. „Things“ sloužící k příjmu informací odesílaných z indukčních senzorů z otočného stolu a enkodéru krokového motoru.



Obr. 52 Thingworx Composer

## 10.2 ThingWorx Studio

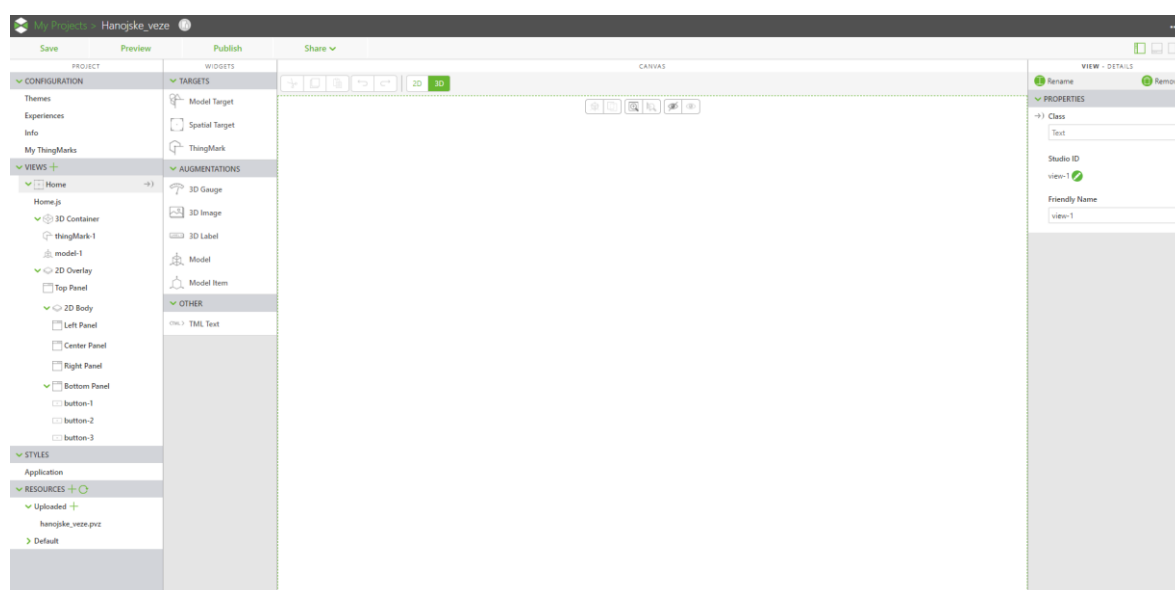
Pro tvorbu rozšířené reality je využívána zkušební 30-denní verze programu ThingWorx Studio, která umožňuje použití 3 markerů – Thingmark pro publikování vytvořených projektů.



Obr. 53 Thingmark [9]

Vytvořené aplikace byly vytvořeny pro použití a zobrazení pomocí smartphonů a tabletů.

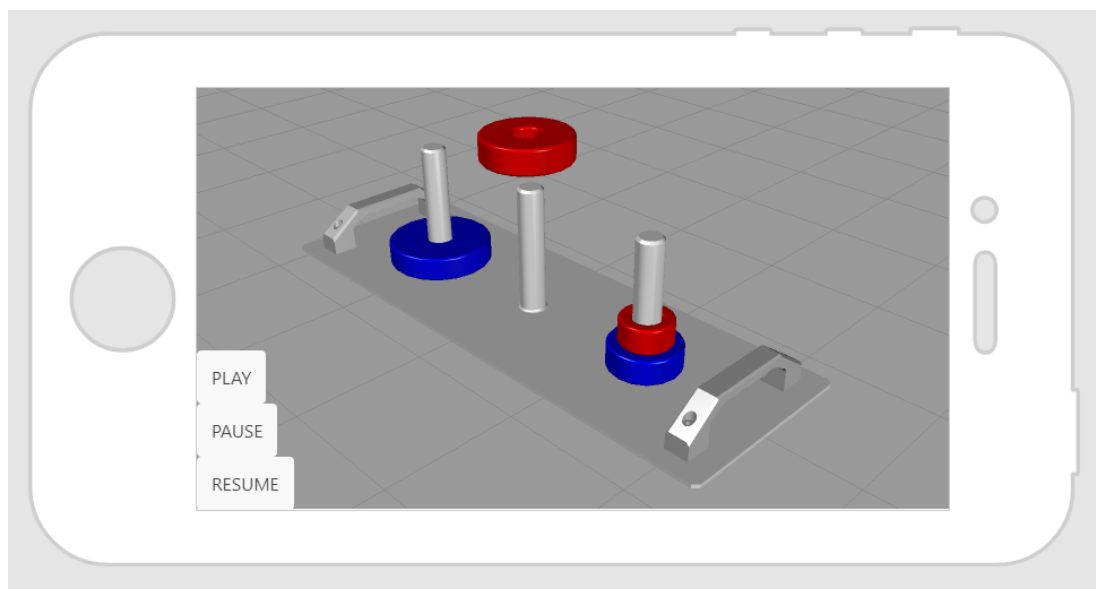
Jako vstup pro ThingWorx Studio byly použity soubory s příponou \*.pvz, které jsou vloženy do příloh této diplomové práce. Tento typ souboru je výstupem z programu PTC Creo Illustrate a slouží jako archiv, který obsahuje model i vytvořené animované sekvence, který byly využity jako video návody v rozšířené realitě.



Obr. 54 ThingWorx Studio

### 10.3 Hanojské věže

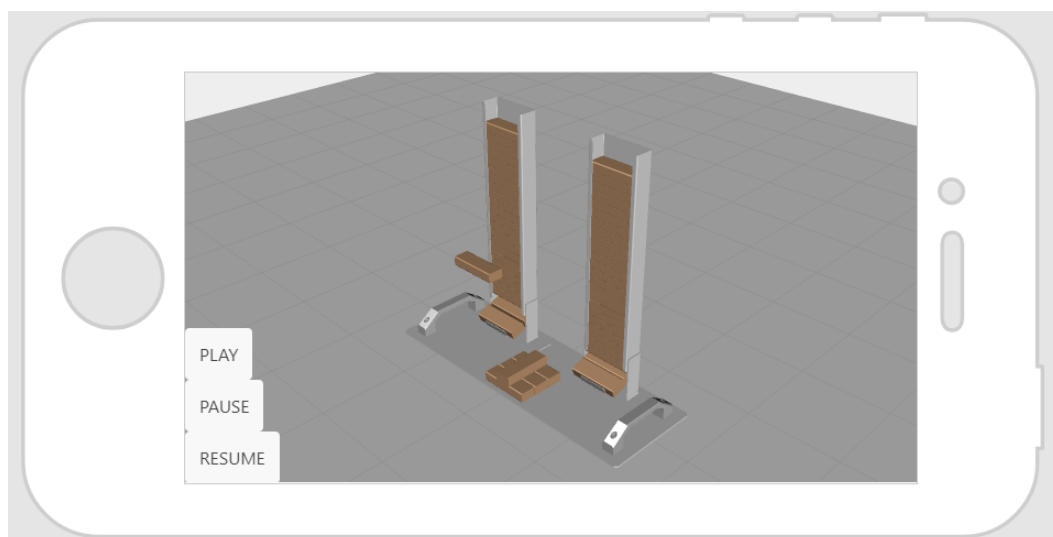
Jako první byla pro aplikaci rozšířené reality vybrána laboratorní úloha Hanojské věže. Pro tuto úlohu byl zpracován interaktivní návod, který umožní posluchačům náhled pomocí rozšířené reality na jedno z možných řešení úlohy. Animace byla zpracována jako sekvence v softwaru Creo Illustrate. Aplikace obsahuje tlačítka pro spuštění, pauzu a pokračování přehrávání animace. Podklady, ze kterých byla tato aplikace vytvořena jsou přiloženy do příloh této práce.



Obr. 55 Náhled Hanojské věže

### 10.4 Jenga

Další aplikací rozšířené reality do výuky je interaktivní návod pro laboratorní úlohu Jenga. Pro tuto laboratorní úlohu byl také zpracován video návod, který prezentuje jednu z možností využití dvou podavačů a 56 hranolů Jenga. Návod ukazuje návod složení věže před začátkem hry. Aplikace obsahuje tlačítka pro spuštění, pauzu a pokračování přehrávání animace. Výstupní soubor z CREO Illustrate bude také přiložen do příloh této diplomové práce.



Obr. 56 Náhled Jenga

## 10.5 Montáž pohonu otočného stolu

Dalším možným využitím rozšířené reality je možnost nasazení při montáži a údržbě zařízení. Tato další možnost využití rozšířené reality je demonstrována na otočném stole, kdy je pomocí markeru možné pomocí smartphonu načíst interaktivní montážní postup pohonné jednotky.

Tento otočný stůl je také vybaven šesti indukčními senzory, což poskytuje potřebné vstupy do navržené IoT aplikace. Pokud bylo dosaženo konektivity s ThingWorx Composer, tyto indukční senzory poskytují v reálném čase informaci o tom, která úloha je právě připravena pro interakci s robotem nebo na které úloze právě robot pracuje.

Dalším vstupem do navržené IoT aplikace, při spojení s ThingWorx Composer, je enkodér krokového motoru, který umožňuje sledování a odesílání dat o poloze rychlosti otáčení otočného stolu v reálném čase. Tyto informace pak mohou být zaznamenány a dále analyzovány.

### 10.5.1 Tvorba Model Tagu

Tagy slouží k zařazení jednotlivých objektů do kategorií, což dále zjednodušuje práci s při tvorbě IoT aplikace a také vyhledávání.

The screenshot shows the 'New Model Tag Vocabulary' interface. The sidebar on the left has 'ENTITY INFORMATION' with 'General Information' selected, and 'PERMISSIONS' with 'Visibility', 'Design Time', and 'Run Time' options. The main panel is titled 'General Information' and contains a form with the following fields:

- Name:** A text input field containing 'Otocny\_stul'.
- Description:** A large text area.
- Project:** A dropdown menu with 'Search Projects' and a search icon.
- Tags:** A dropdown menu with 'Search Model Vocabulary' and a search icon.
- Dynamic:** A checkbox that is currently unchecked.

At the top of the interface, there are buttons for 'Manage Terms', 'Save', 'Cancel Edit', and 'To Do'.

Obr. 57 Model Tag

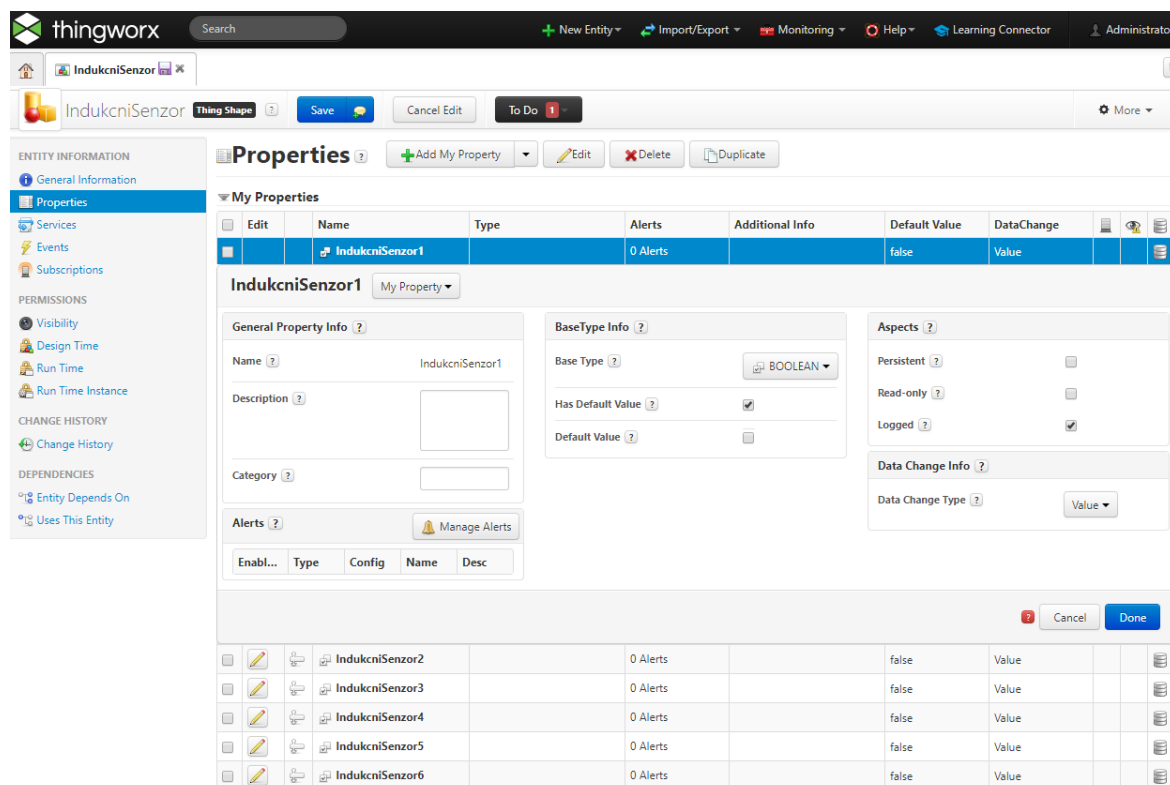
### 10.5.2 Tvorba Thing Shapes

Thing Shapes jsou objekty, které obsahují vlastnosti a metody. Při použití analogie s objektově orientovaným programováním lze Thing Shapes přirovnat k rozhraní. Rozhraní objektu určuje způsob, jakým lze s objektem komunikovat. V tomto případě je to způsob, jakým objekt, konkrétně Indukční senzory a krokový motor, komunikují s aplikací a odesílají informace o otočném stole.

Nejprve bylo přidáno rozhraní pro indukční senzory, kterému byl přidělen Tag *Otocny\_Stul*, který byl vytvořen dříve. Bylo vytvořeno rozhraní *IndukcniSenzor* a ve vlastnostech navrženého rozhraní bylo vytvořeno šest indukčních senzorů *IndukcniSenzor1* až *6*, které komunikují s aplikací.

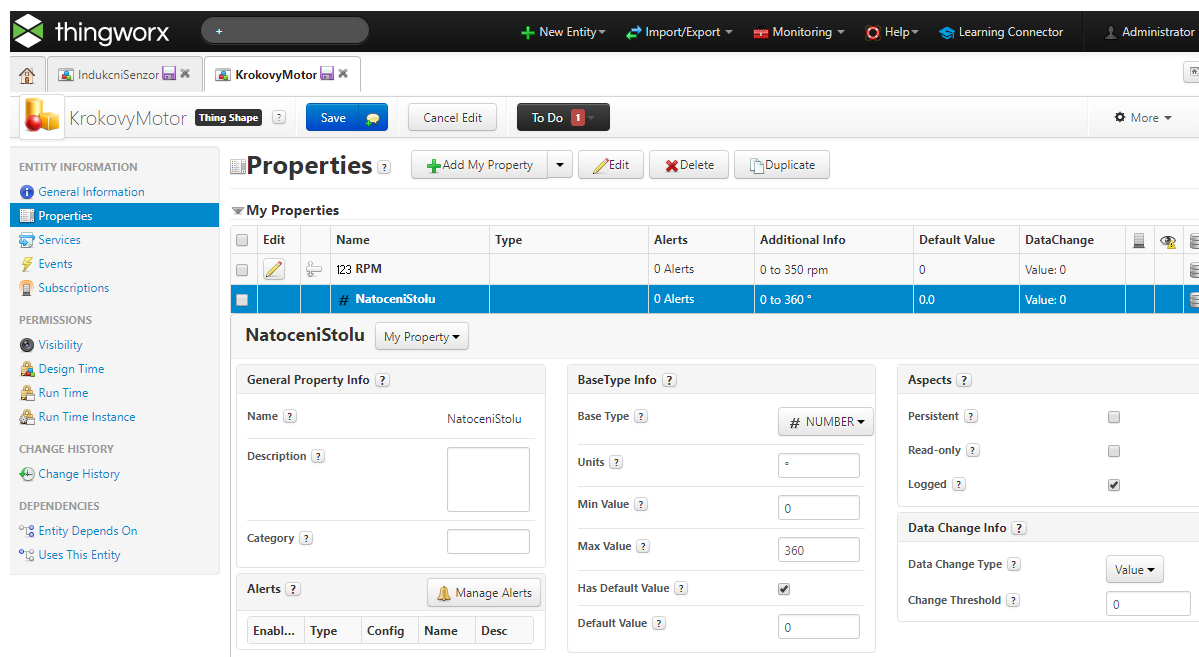
Každý z indukčních senzorů má přidělenou základní Boolean hodnotu *false*, což znamená, že není sepnutý. Pokud se stůl otočí do polohy, ve které dojde k sepnutí indukčního senzoru, jeho hodnota se změní na *true*, tedy indikuje, která úloha se nachází v pracovním prostoru robotu.

Tato informace je pak odeslána přes ThingWorx Foundation Server do ThingWorx Studio, kde je zobrazena pomocí rozšířené reality. 3D popisek, který ukazuje číslo úlohy u modelu otočného stolu je svázán s touto informací.



Obr. 58 Rozhraní IndukcniSenzor

Dále bylo vytvořeno rozhraní pro krokový motor, které obsahuje dvě vlastnosti: *RPM* a *NatoceniStolu*. Tyto vlastnosti poskytují informace o otáčkách krokového motoru v rozmezí 0-350 ot./min a aktuálního natočení otočné části stolu v rozmezí 0-360°. Ty informace jsou odeslány do ThingWorx Studio, kde je zobrazena pomocí rozšířené reality s otočným stolem.



Obr. 59 Rozhraní KrokovyMotor

### 10.5.3 Tvorba Thing Template

Thing Template lze opět charakterizovat pomocí analogie s objektově orientovaným programováním, tedy jako třídu obsahující objekty. Objekty uvnitř třídy jsou dříve vytvořené Thing Shapes.

V rámci IoT aplikace byla vytvořena třída Thing Template *OtocnyStul\_Template*, která obsahuje Thing Shapes *IndukcniSenzor* a *KrokovyMotor* a jejich vlastnosti. Také byl této třídě přidělen tag *Otocny\_stul*.

The screenshot shows the ThingWorx interface for editing the 'OtocnyStul\_Template' Thing Template. The left sidebar contains navigation options like 'General Information', 'Properties', 'Services', 'Events', 'Subscriptions', 'Permissions', 'Change History', and 'Dependencies'. The main panel displays the 'Properties' section, which is divided into three main categories: 'My Properties', 'Base Thing Template - Properties', and 'ThingShapes - Properties'.

**My Properties**

Edit	Name	Type	Alerts	Additional Info	Default Value	DataChange	Icons
	-T- ID_Otocny_stul		0 Alerts		OtocnyStul_UCR	Value	

**Base Thing Template - Properties**

**ThingShapes - Properties**

**IndukcniSenzor**

Name	Type	Alerts	Additional Info	Default Value	DataChange	Icons
IndukcniSenzor1		0 Alerts		false	Value	
IndukcniSenzor2		0 Alerts		false	Value	

**KrokovyMotor**

Name	Type	Alerts	Additional Info	Default Value	DataChange	Icons
123 RPM		0 Alerts	0 to 350 rpm	0	Value: 0	
# NatoceniStolu		0 Alerts	0 to 360 °	0,0	Value: 0	

Obr. 60 Thing Template

### 10.5.4 Tvorba Thing

Nakonec byl v ThingWorx Composer vytvořen *OtocnyStul\_Thing*, jemuž byl přidělen tag *Otocny\_Stul* a Template *OtocnyStul\_Template*. Thing představuje digitální reprezentaci fyzického objektu otočného stolu. Pomocí analogie s objektově orientovaným programováním lze Thing přirovnat opět ke třídě.

Tento *OtocnyStul\_Thing* je dále načten do ThingWorx Studia jako externí data a spojen s virtuální reprezentací otočného stolu.

**Properties**

**My Properties**

Name	Type	Alerts	Additional Info	Default Val...	Value	DataChange
No Properties						

**OtocnyStul\_Template (ThingTemplate) - Properties**

Name	Type	Alerts	Additional Info	Default Value	Value	DataChange
ID_Otocny_stul		0 Alerts		OtocnyStul_UCI	OtocnyStul_UCR	Value

**IndukcniSenzor**

Name	Type	Alerts	Additional Info	Default Val...	Value	DataChange
IndukcniSenzor1		0 Alerts		false	false	Set Value
IndukcniSenzor2		0 Alerts		false	false	Set Value

**KrokovyMotor**

Name	Type	Alerts	Additional Info	Default Val...	Value	DataChange
123 RPM		0 Alerts	0 to 350 rpm	0	0	Set Value: 0
# NatoceniStolu		0 Alerts	0 to 360 °	0.0	0.0	Set Value: 0

Obr. 61 Thing

## 10.5.6 ThingWorx Studio

Nakonec byl vytvořený Thing *OtocnyStul\_Thing* z ThingWorx Composer připojen k popiskům modelu otočného stolu v ThingWorx Studio pomocí záložky EXTERNAL DATA a také byla nahrána sekvence pro demontáž a montáž pohonné jednotky.

**My Projects > Otocny\_stul**

**CONFIGURATION**

- Themes
- Experiences
- Info
- My ThingMarks
- VIEWS**
  - Home
  - Home.js
  - 3D Container
  - thingMark-1
  - Otocny\_stul
  - 2D Overlay
  - Top Panel
  - 2D Body
  - Left Panel
  - Center Panel
  - Right Panel
  - Bottom Panel
- STYLES**
  - Application
- RESOURCES**
  - Uploaded
  - Otocny\_stul.pvz
  - Default

**TARGETS**

- Model Target
- Spatial Target
- ThingMark

**AUGMENTATIONS**

- 3D Gauge
- 3D Image
- 3D Label
- Model
- Model Item

**OTHER**

- TML Text

**CANVAS**

**DATA**

- APPLICATION PARAM...
- EXTERNAL DATA

**Parameters:**

- X Coordinate: -0,221
- Y Coordinate: 0,051
- Z Coordinate: 0,207
- X Rotation: 0
- Y Rotation: 0
- Z Rotation: 0
- Visible: ☒
- Occluding: ☐
- Always on top: ☐
- Opacity (1 Opaque - 0 Transparent): 1
- Current Step: %
- Playing: ☐
- Sequence: Figure 1
- Steps: ☐
- Studio ID:

Obr. 62 Náhled na tvorbu AR otočného stolu

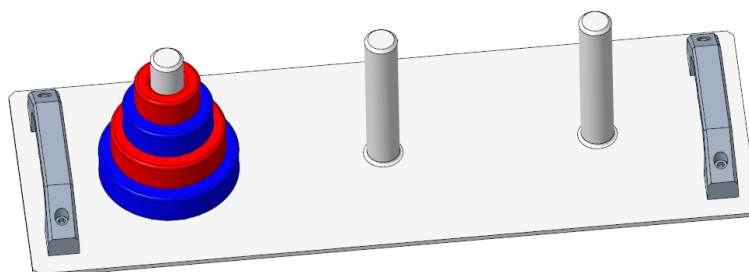


## 11. Návod k laboratorní úloze

Jak již bylo rozebráno podrobněji v předchozích kapitolách, tvorba programu lze použít teach-pendant nebo Robot Studio, ze kterého lze pořídit vygenerovaný RAPID kód.

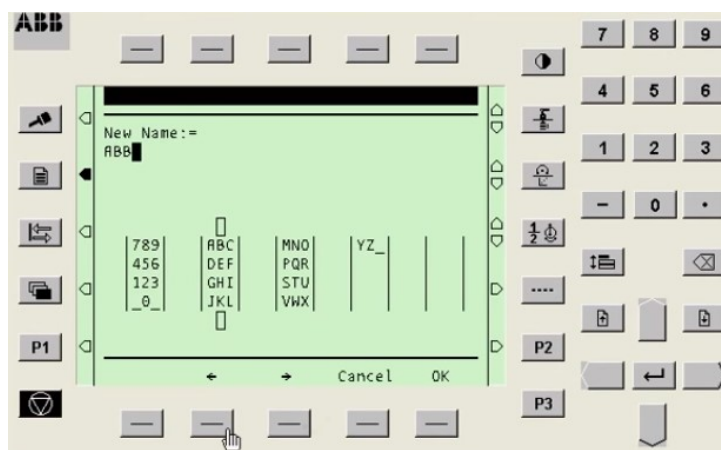
V tomto návodu bude uveden postup pouze pro online programování, tedy použití teach-pendantu pro laboratorní úlohu Hanojské věže. Mezi důležité informace pro tvorbu programu patří:

- Výška sloupku: 100 mm
- Rozestup mezi sloupky: 115 mm
- Výška kamenný: 20 mm



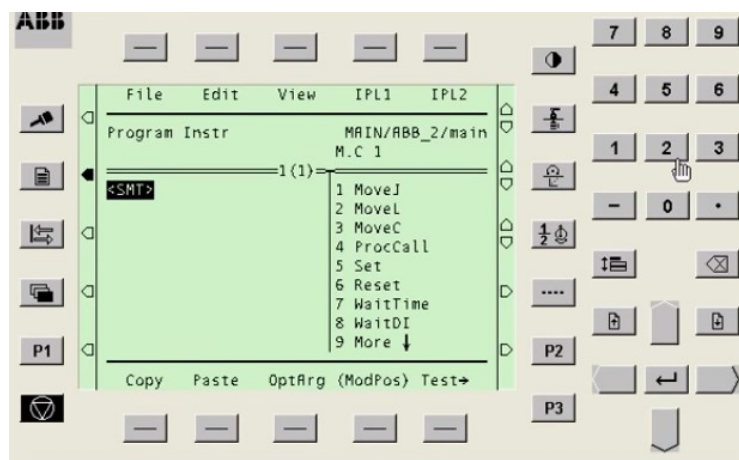
Obr. 63 Laboratorní úloha hanojské věže

Prvním krokem je založení nového programu. Po spuštění řídicího systému (S4C+) se program založí pomocí kliknutí na *Soubor* a vybere se *Nový*. Dále je třeba vyplnit název programu a potvrdím tlačítkem *OK*. Název programu se nesmí shodovat s jiným programem a doporučuje se název do 8 znaků.



Obr. 64 Založení programu [30]

Nyní dojde k zobrazení okna pro zadávání instrukcí programu. Pro vkládání instrukcí je na pravé straně zobrazen výběr instrukcí, kterým je možno listovat a podle uvedeného čísla u dané instrukce se po stisknutí tlačítka s příslušným číslem instrukce vloží do programu.



Obr. 65 Instrukce programu [30]

Programu by měl vždy začít najetím robotu do základní polohy

Základními instrukcemi pro pohyb robotu jsou *MoveJ*, *MoveL* a *MoveC*.

*MoveJ* je instrukce používaná v případě, kdy není nezbytně nutné dodržet přesnou trajektorii koncového bodu.

*MoveL* je instrukce pro lineární pohyb robotu z koncového bodu, ve kterém se robot nachází do dalšího definovaného bodu.

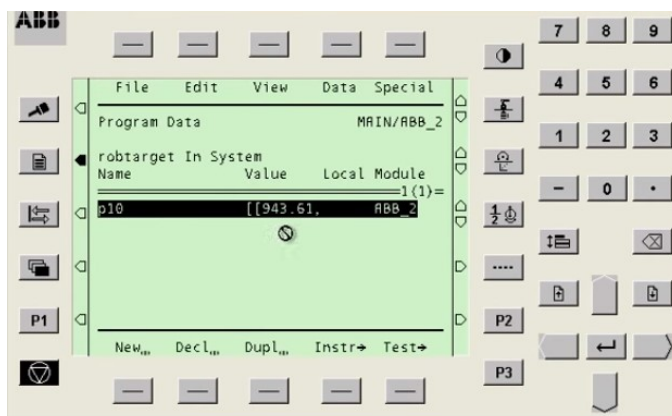
*MoveC* instrukce pro pohyb po kružnici. Zadávání instrukce je kromě koncového bodu také třeba definovat bod, který leží na kružnici, kterou má koncový bod robotu opsat.

Příklad instrukce: *MoveJ p10, v500, z10, tool0*;

- *p10* je definovaný bod, do kterého se má robot dostat
- *v500* je rychlost koncového bodu – v tomto případě  $500 \text{ mm.s}^{-1}$
- *z10* je zóna, kterou musí robot projet při pohybu, zóna je definována jako sféra se středem v koncovém bodě o definovaném poloměru – v tomto případě 10 mm
- *tool0* definuje nástroj robotu

Doporučuje se pokračovat tvorbou bodů neboli robtargetů. Jako první je vhodné vytvořit základní polohu. Robtarget lze vytvořit po zadání instrukce najetí kurzorem nad místem v instrukci, kde by měl být zadán bod koncové trajektorie, ale místo něj se nachází pouze symbol \*. Po potvrzení symbolu \* následuje výběr pomocí tlačítka *Nový*. Při pojmenování

robtargetu se doporučuje použití maximálně 8 znaků. V režimu *Jogging* pomocí joysticku teach-pendantu robot nastavíme do požadované polohy a uložíme bod.



Obr. 66 Vytvoření robtarget [30]

Pro tvorbu programu pro laboratorní úlohu Hanojské věže je vhodné vytvořit bod v základní poloze a bod nad prvním sloupkem. Další body trajektorie je možné a výhodné vytvářet pomocí instrukce *Offs*.

Příklad instrukce: *Offs(p10, 100, 0, 60), v500, z10, tool0;*

- *p10* je definovaný bod, do kterého se má robot dostat
- *100, 0, 60* jsou posuny ve směru x, y, z od *definovaného* bodu *p10*
- *v500* je rychlost koncového bodu – v tomto případě  $500 \text{ mm.s}^{-1}$
- *z10* je zóna, kterou musí robot projet při pohybu, zóna je definována jako sféra se středem v koncovém bodě o definovaném poloměru – v tomto případě 10 mm
- *tool0* definuje nástroj robotu

Pro ovládání efektorů se používá ovládání digitální výstupů, které odpovídají např. sevření a otevření efektoru. Jedná se o instrukci *SetDO*

Příklad instrukce: *SetDO DO1, 1;*

Tato instrukce nastaví hodnotu digitálního výstupu 1 na hodnotu 1, což sevře čelisti efektoru

Je výhodné umístit do programu před uchopením a upuštěním objektu instrukci *WaitTime*. Doba čekání se zadává se v sekundách.

Příklad instrukce: *WaitTime\InPos,0.5;*

## 12. Závěr

Na závěr bude v této kapitole shrnut průběh prací na této diplomové práci a zhodnoceny dosažené výsledky.

Jako první byla provedena analýza současného stavu pracoviště a možnost využití robotu ABB IRB 1400, který se nachází v univerzitním centru robotiky. Analýza se zabývala zejména možnostmi využití robotu a pracoviště při laboratorním cvičení. Z těchto důvodů by nebylo praktické navrhnout technologického pracoviště. Byla zjištěna určitá omezení ve využití řídicí jednotky robotu při programování.

Na základě analýzy byl stanoven časový harmonogram činností s termíny plnění. Je nutné uvést, že termíny stanovené v diagramu se nepodařilo dodržet. Jedním z důvodů byly problémy se zprovozněním řídicího systému, kde bylo po zprovozněním a výměně baterií potřeba řešit poruchu a výměnu počítače v řídicí jednotce. Dále při řešení návrhu a využití pracoviště a laboratorních úloh došlo ke zdržení z důvodu návrhu několika nevhodných řešení a nutnosti přepracování koncepce pracoviště.

Řídicí jednotka byla zprovozněna a byly navrženy způsoby řízení programování robotu. Online programování s teach-pendatem je bez omezení, avšak při offline programování existují určitá omezení, proto se doporučuje samostatná tvorba programu na PC a přenesení do řídicí jednotky pomocí diskety.

Byly navrženy tři varianty řešení pracoviště v univerzitním centru robotiky a pomocí vícekritériální analýzy vybrána vítězná varianta. Vítězná varianta obsahuje i otočný stůl. Otočný stůl byl navržen a vypočítán pro využití několika laboratorních úloh. Na navržený otočný stůl lze umístit až šest laboratorních úloh. Tento stůl je také možno využít pro IoT aplikaci díky výstupu z enkodéru pohonné jednotky. Práce se také zabývá logikou pracoviště, postupu činností na pracovišti a jeho zabezpečením. Výstupem je 3D model, který byl vytvořen v softwaru PTC Creo Parametric.

Dále byly navrženy tři laboratorní úlohy pro pracoviště, které byly vybrány pro výuku laboratorních cvičení. Tyto úlohy simulují do určité míry Pick and Place aplikace, paletizaci, svařovací aplikace a tvorbu jednoduchých algoritmů. Pro dvě z těchto úloh byly vytvořeny animované sekvence v PTC Creo Illustrate a využity jako návod pomocí rozšířené reality ve výuce.

Při tvorbě rozšířené reality a IoT aplikací bylo potřeba také vyřešit několik překážek, které stěžovaly práci a vypracování. Největším problémem byla nedostupnost licencí na software, který byl používán pro tvorbu těchto aplikací. Dalším problémem byla nedostupnost serveru. Diplomová práce byla vypracována pomocí několika 30denních zkušebních verzí.

Navzdory těmto obtížím byly IoT aplikace a aplikace rozšířené reality úspěšně dokončeny. Tyto aplikace jsou dostupné pomocí markerů, které se načtou a stáhnou do smartphonu nebo tabletu potřebná data. Tato zařízení potřebují přístup k internetu a nainstalovanou aplikaci pro načtení výše zmíněných markerů. Markery nebyly vloženy do příloh, neboť v době odevzdání diplomové práce jsou již po vypršení platnosti zkušební verze a nejsou funkční. Pro názornou ukázkou při obhajobě diplomové práce budou tyto aplikace vypracovány znovu.

Podle pokynů vedoucího práce byla také zpracována výkresová dokumentace, čímž byly splněny všechny body zadání této diplomové práce.

Přílohy práce obsahují CAD model pracoviště, výkresovou dokumentaci, animace použité při tvorbě virtuální reality. Přílohy neobsahují samotné IoT a AR aplikace, neboť jejich vývoj probíhal v internetovém prohlížeči a data byla uložena pouze na ThingWorx Server.

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Zdeňkovi Konečnému, PhD. za cenné rady a připomínky při odborném vedení diplomové práce. Děkuji také své rodině za podporu při studiu.

## Seznam obrázků

Obr. 1 Robot ABB IRB 1400 .....	12
Obr. 2 Popis jednotlivých os robotu [1] .....	13
Obr. 3 Řídicí jednotka robotu [2] .....	13
Obr. 4 Rozměry robotu [1] .....	14
Obr. 5 Rozsah pohybu robotu [1] .....	14
Obr. 6 Aktuální stav pracoviště .....	15
Obr. 7 Řídicí jednotka S4C+ .....	16
Obr. 8 Půdorys pracoviště .....	17
Obr. 9 IoT architektura [5] .....	18
Obr. 10 Příklad použití markerů [9] .....	19
Obr. 11 Čárový kód a QR kód [8] .....	20
Obr. 12 Komponenty platformy Thingworx [9] .....	21
Obr. 13 Ganttův diagram činností .....	23
Obr. 14 Online programování [11] .....	24
Obr. 15 Teach-pendamt robotu ABB IRB 1400 [1] .....	25
Obr. 16 Komunikace s robotem [1] .....	25
Obr. 17 Offline programování v Robot Studiu [12] .....	26
Obr. 18 Komunikace s počítačem [1] .....	26
Obr. 19 Varianta pracoviště 1a .....	28
Obr. 20 Varianta pracoviště 1b .....	29
Obr. 21 Varianta pracoviště 2 .....	30
Obr. 22 Varianta 1 otočné části stolu .....	37
Obr. 23 Deformace po zatížení Varianta 1 .....	37
Obr. 24 Varianta 2 otočné části stolu .....	38
Obr. 25 Deformace po zatížení Varianta 2 .....	38
Obr. 26 Varianta 3 otočné části stolu .....	39
Obr. 27 Deformace po zatížení Varianta 3 .....	39
Obr. 28 Finální model otočného stolu .....	40
Obr. 29 Krokový motor SC6018L4204-ENO24K [13] .....	41
Obr. 30 Závislost momentu a výkonu na otáčkách [13] .....	42
Obr. 31 Planetová převodovka PLE60-1S-10 [14] .....	42
Obr. 32 Uložení vertikální osy stolu .....	47

Obr. 33 Pohled na hřídelová pera.....	48
Obr. 34 Pohled na pero převodovky.....	51
Obr. 35 Rám otočného stolu.....	52
Obr. 36 Polohovací noha LV.F-80 [19] .....	53
Obr. 37 Finální varinata pracoviště .....	54
Obr. 38 Schunk PGN-plus 80-1 [21].....	55
Obr. 39 Schunk GWB-64 [22] .....	56
Obr. 40 Schunk PZN-plus 64-1 [23] .....	56
Obr. 41 Schunk PGF 80 AS [24].....	57
Obr. 42 Schunk SHK-040-000-000 [25] .....	58
Obr. 43 Dispoziční řešení pracoviště .....	59
Obr. 44 Oplocení Axelent X-Guard [26] .....	60
Obr. 45 Sick M2000 Standard [27] .....	60
Obr. 46 Zabezpečení pracoviště .....	61
Obr. 47 Logika pracoviště .....	63
Obr. 48 Hanojské věže .....	64
Obr. 49 Jenga.....	65
Obr. 50 Úloha s fixy.....	65
Obr. 51 ThingWorx Server.....	66
Obr. 52 Thingworx Composer .....	66
Obr. 53 Thingmark [9] .....	67
Obr. 54 ThingWorx Studio .....	67
Obr. 55 Náhled Hanojské věže.....	68
Obr. 56 Náhled Jenga .....	69
Obr. 57 Model Tag.....	70
Obr. 58 Rozhraní IndukcniSenzor.....	71
Obr. 59 Rozhraní KrokovyMotor.....	71
Obr. 60 Thing Template .....	72
Obr. 61 Thing .....	73
Obr. 62 Náhled na tvorbu AR otočného stolu.....	73
Obr. 63 Laboratorní úloha hanojské věže .....	74
Obr. 64 Založení programu [30] .....	74
Obr. 65 Instrukce programu [30].....	75
Obr. 66 Vytvoření robtarget [30] .....	76



## Seznam tabulek

Tab. 1 Parametry robotu ABB IRB 1400 [1] .....	12
Tab. 2 Rozsah jednotlivých os robotu [1] .....	13
Tab. 3 Parametry řídicí jednotky S4C+ [1] .....	14
Tab. 4 Soupis činností .....	22
Tab. 5 Popis varianty pracoviště 1a .....	29
Tab. 6 Popis varianty pracoviště 1b .....	30
Tab. 7 Popis varianty pracoviště 2 .....	31
Tab. 8 Volba kritérií .....	32
Tab. 9 Hodnocení kritérií .....	32
Tab. 10 Zhodnocení variant .....	33
Tab. 11 Určení významnosti kritérií .....	33
Tab. 12 Součet vážených indexů $I_{ij}$ * Varianta 1a.....	34
Tab. 13 Součet vážených indexů $I_{ij}$ * Varianty 1b.....	34
Tab. 14 Součet vážených indexů $I_{ij}$ * Varianty 2.....	34
Tab. 15 Výsledek vícekritériální analýzy.....	35
Tab. 16 Technické údaje motoru [13] .....	41
Tab. 17 Technické údaje převodovky [14].....	43
Tab. 18 Technické parametry ložiska [16].....	46
Tab. 19 Technické údaje spojky [18].....	47
Tab. 20 Popis uložení vertikální osy stolu .....	48
Tab. 21 Popis pracoviště .....	54
Tab. 22 Parametry efektoru PGN-plus 80-1 [21].....	55
Tab. 23 Parametry efektoru GWB-64 .....	56
Tab. 24 Parametry efektoru PZN-plus 64-1 [23] .....	57
Tab. 25 Parametry efektoru PGF 80 AS [24].....	57
Tab. 26 Parametry Schunk SHK-040-000-000 [25].....	58
Tab. 27 Parametry Sick M2000 Standard [27].....	60

## Seznam použité literatury

- [1] *Product Online Manual IRB 1400* [online]. [cit. 2017-10-25]. Dostupné z: <http://rab.ict.pwr.wroc.pl/irb1400/prod14.pdf>
- [2] *ABB Robotika: ABB IRB 1400* [online]. [cit. 2017-10-25]. Dostupné z: <http://new.abb.com/products/robotics/cs/prumyslove-roboty/irb-1410>
- [3] *Internet of Things* [online]. [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: <https://internetofthingsagenda.techtarget.com/definition/Internet-of-Things-IoT>
- [4] *IoT* [online]. [cit. 2017-10-25]. Dostupné z: <http://i2ot.eu/internet-of-things/>
- [5] *Software-Defined Industrial Internet of Things in the Context of Industry 4.0* [online]. [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7467436/>
- [6] *A Survey of Augmented Reality* [online]. [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/831d/55d38104389de256c501495539a73118db7f.pdf>
- [7] *FURHT. Handbook of Augmented Reality* [online]. [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: <https://www.springer.com/us/book/9781461400639>
- [8] STEJSKAL, Ondřej. *Rozšířená realita a její využití v současné době* [online]. Brno, 2016 [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/th/x7r8p/>. Diplomová práce. Masarykova univerzita, Filozofická fakulta. Vedoucí práce Tomáš Staudek.
- [9] *Making mark augmented reality* [online]. [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: <https://industrial-iot.com/2016/09/making-mark-augmented-reality/>
- [10] *ThingWorx* [online]. [cit. 2017-10-25]. Dostupné z: <http://www.aveng.cz/software-services/software/thingworx>
- [11] DVOŘÁK, R. *Programování průmyslových robotů KUKA*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 42 s. 5 příloh. Vedoucí bakalářské práce Ing. Aleš Pochylý
- [12] *ABB Robot Studio: Programování offline* [online]. [cit. 2018-04-30]. Dostupné z: <http://new.abb.com/products/robotics/cs/robotstudio>

- [13] *SC6018L4204-ENO24K — STEPPER MOTOR WITH CONNECTOR – NEMA 24* [online]. [cit. 2018-03-21]. Dostupné z: <https://en.nanotec.com/products/1695-sc6018l4204-eno24k/>
- [14] *GPLE60-1S-10 — PRECISION PLANETARY GEARS* [online]. [cit. 2018-03-21]. Dostupné z: <https://en.nanotec.com/products/1867-gple60-1s-10/>
- [15] KALÁB, Květoslav. *Části a mechanismy strojů pro bakaláře: části pohonů strojů*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1860-3.
- [16] *SKF: Angular contact ball bearings, double row* [online]. [cit. 2018-03-21]. Dostupné z: <http://www.skf.com/group/products/bearings-units-housings/ball-bearings/angular-contact-ball-bearings/double-row-angular-contact-ball-bearings/double-row/index.html?designation=3305%20A-2Z>
- [17] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 3. dopl. vyd. Úvaly: Albra, 2006. ISBN 80-7361-033-7.
- [18] *T.E.A. TECHNIK s.r.o.: PRUŽNÉ BEZVŮLOVÉ SPOJKY KBE* [online]. [cit. 2018-03-22]. Dostupné z: <https://www.teatechnik.cz/pruzne-bezvulove-spojky-kbe/>
- [19] *Polohovací nohy pro připevnění k podlaze* [online]. [cit. 2018-04-12]. Dostupné z: <https://www.elesa-ganter.cz/vyrobky/polohovaci-prvky/skupina/lv-f>
- [20] *ThingWorx View* [online]. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: [https://play.google.com/store/apps/details?id=com.ptc.vuforiaiview&hl=en\\_US](https://play.google.com/store/apps/details?id=com.ptc.vuforiaiview&hl=en_US)
- [21] *Schunk PGN-plus 80-1* [online]. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: [https://schunk.com/hu\\_en/clamping-technology/seriesaccessory/pgn-plus/product/910-0371101-pgn-plus-80-1/](https://schunk.com/hu_en/clamping-technology/seriesaccessory/pgn-plus/product/910-0371101-pgn-plus-80-1/)
- [22] *Schunk GWB-64* [online]. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <https://schunk.com/fileadmin/pim/docs/IM0007267.PDF>
- [23] *Schunk PZN-plus 64-1* [online]. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: [https://schunk.com/de\\_en/gripping-systems/series/pzn-plus/](https://schunk.com/de_en/gripping-systems/series/pzn-plus/)
- [24] *Schunk PGF 80 AS* [online]. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: [https://schunk.com/de\\_en/gripping-systems/product/3146-0340371-pgf-80-as/](https://schunk.com/de_en/gripping-systems/product/3146-0340371-pgf-80-as/)
- [25] *Schunk SHK-040-000-000* [online]. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: [https://schunk.com/de\\_en/gripping-systems/product/48101-0310400-shk-040-000-000/](https://schunk.com/de_en/gripping-systems/product/48101-0310400-shk-040-000-000/)

- [26] *Haberkon: Ochranná oplocení: Axelent* [online]. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: [http://www.haberkorn.cz/dyndoc/download/ss-oploceni-x\\_guard\\_techicke\\_informace.pdf](http://www.haberkorn.cz/dyndoc/download/ss-oploceni-x_guard_techicke_informace.pdf)
- [27] *Sick deTec / Typ 4: Bezpečnostní světelné závěsy* [online]. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <https://www.sick.com/cz/cs/optoelektronicka-ochranna-zarizeni/bezpecnostni-svetelne-zavesy/detec/detec4-core-set-14-1200/p/p328935>
- [28] *SICK ES21-SA10E1* [online]. [cit. 2018-05-08]. Dostupné z: <https://www.sick.com/cz/cs/blokovaci-zarizeni/bezpecnostni-ovladaci-pristroje/es21/es21-sa10e1/p/p79960>
- [30] *ABB Robot Studio TUTORIAL* [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: [http://fc.civil.tamu.edu/resources/ie/NCProg/Docs/webmaterials/Robotics%20Module/robotstd\\_tutor.htm](http://fc.civil.tamu.edu/resources/ie/NCProg/Docs/webmaterials/Robotics%20Module/robotstd_tutor.htm)

## Seznam příloh

### CD ROM

Diplomová práce .docx .pdf

Příloha A: CAD model pracoviště

Příloha B: Výkresová dokumentace

Příloha C: Podklady pro tvorbu AR aplikace Hanojské věže

Příloha D: Podklady pro tvorbu AR aplikace Jenga

Příloha E: Podklady pro tvorbu AR a IoT aplikace Otočný stůl

Příloha F: Seznam instrukcí a funkcí RAPID BaseWare OS